ACRP Advisory Committee on Radiological Protection

CCRP Comité consultatif de la radioprotection

Advisory Committees of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comités consultatifs de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

COMMITTEE REPORTS

Since the 1950's the Atomic Energy Control Board has made use of advisory committees of independent experts to assist it in its decision-making process. In 1979 the Board restructured the organization of these consultative groups, resulting in the creation of two senior level scientific committees charged with providing the Board with independent advice on principles, standards and general practices related to radiation protection and the safety of nuclear facilities. The two committees are the Advisory Committee on Radiological Protection (ACRP), formed in 1979, and the Advisory Committee on Nuclear Safety (ACNS), which was established a year later. Summaries of meetings of the committees are available to the public in the AECB library in Ottawa.

From time to time the committees issue reports which are normally published by the AECB and catalogued within the AECB's public document system. Committee reports, bound with a distinctive cover, carry both a committee-designated reference number, e.g. ACRP-1, and an AECB reference number in the "INFO" series. The reports generally fall into two broad categories: (i) recommendations to the Board on a particular technical topic, and (ii) background studies. **Unless specifically stated otherwise, publication by the AECB of a committee report does not imply endorsement by the Board of the content, nor acceptance of any recommendations made therein.**

RAPPORTS DES COMITÉS

Depuis les années cinquante, la Commission de contrôle de l'énergie atomique fait appel à des comités consultatifs composés d'experts indépendants pour l'aider dans ses prises de décision. En 1979, la CCEA a restructuré l'organisation de ces groupes de consultation pour former deux comités scientifiques supérieurs chargés de lui fournir des conseils indépendants concernant les principes, les normes et les méthodes générales touchant la radioprotection et la sûreté des installations nucléaires : ce sont le Comité consultatif de la radioprotection (CCRP), formé en 1979, et le Comité consultatif de la sûreté nucléaire (CCSN), établi l'année suivante. Le public peut consulter les comptes rendus des réunions de ces comités à la bibliothèque de la CCEA, à Ottawa.

Les comités rédigent à l'occasion des rapports qui sont normalement publiés par la CCEA et catalogués dans la collection des documents publics de la CCEA. Reliés avec une couverture distincte, les rapports des comités se reconnaissent à leur numéro de référence du comité d'origine (comme CCRP-1) et à leur numéro de référence de la CCEA dans la série «INFO». Ils se divisent habituellement en deux catégories générales : (i) les recommandations présentées à la Commission au sujet d'une question technique particulière; (ii) les études générales. **À moins d'indication contraire, la publication par la CCEA du rapport d'un comité ne signifie pas que la Commission approuve le contenu de la publication, ni qu'elle en accepte les recommandations.**

Advisory Committees of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comités consultatifs de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

INFO-0340 (E)

ACRP Advisory Committee on Radiological Protection

CCRP Comité consultatif de la radioprotection

ACRP-11

BASIC PRINCIPLES OF RADIATION PROTECTION IN CANADA

by the

Advisory Committee on
Radiological Protection

Approved for publication by the AECB in February 1988

Published in March 1990

An Advisory Committee of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comité consultatif de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

90-05695/2

BASIC PRINCIPLES OF RADIATION PROTECTION IN CANADA

SUMMARY

The major goal of radiation protection in Canada is to ensure that individuals, their progeny and mankind as a whole are adequately protected against the harm that might arise from unwarranted exposure to ionizing radiation. This report deals with the basic principles and organizations involved in protection against ionizing radiation.

Exposure to low doses of ionizing radiation at low dose rates is assumed to increase the incidence of fatal cancers and genetic disorders in the human population by a small fraction which increases in direct proportion to the total radiation dose. The incidence of genetic and somatic effects produced by radiation dose rates below the regulatory limits (50 mSv per year) is too small to be directly measurable as distinct from normally observed incidences of these diseases. They are therefore calculated from internationally accepted estimates based on epidemiological and other evidence obtained at much higher doses.

Three basic principles of radiation protection are (a) that no practice shall be adopted unless its introduction produces a positive net benefit for society, (b) that all exposures shall be kept as low as reasonably achievable, relevant economic and social factors being taken into account, and (c) that doses to individuals should not exceed specified annual limits. The limit for radiation workers is currently 50 mSv per year, and exposures of individual members of the general public should not exceed a small fraction of that applying to radiation workers. For the second of the above principles, an internationally-recommended procedure for deciding what is reasonably achievable is to optimize radiation protection procedures on the basis of cost-benefit analyses.

Other specific areas in radiation protection which have received considerable attention in Canada include limitations on collective dose (the sum of the individual doses for all exposed individuals), exemption rules for radiation doses or amounts of radioactive materials which are extremely small, occupational hazards in uranium mining, and special rules for protection of the foetus in pregnant female radiation workers. Implementation of radiation protection principles in Canada devolves upon the Atomic Energy Control Board, the Department of National Health and Welfare, provincial authorities, licensees and radiation workers. A brief description is given of the roles played by each of these groups.

ADDENDUM

A recent ICRP statement from the September 1987 meeting of the ICRP in Como indicates that estimates of the risk of fatal cancers induced by ionizing radiation may be increased by about 2-fold as a result of recent revisions of estimated doses from the atomic bomb explosions at Hiroshima and Nagasaki in 1945. This cautionary statement needs to be considered when reading the present document.

TABLE OF CONTENTS

Contents		Page
SUMMARY		i
ADDENDUM		i
1.	BIOLOGICAL EFFECTS OF RADIATION	1
	1.1 Introduction	1
	1.2 Stochastic effects	1
	1.3 Non-stochastic effects	6
	1.4 Goals of radiation protection	6
2.	INTERNATIONAL AGENCIES	7
	2.1 General overview	7
	2.2 The ICRP	9
3.	INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS	9
	3.1 Justification of practices	9
	3.2 Optimization of radiation protection (ALARA)	10
	3.3 Individual dose limits	11
4.	APPLICATION OF RADIATION PROTECTION IN SPECIFIC AREAS	13
	4.1 ALARA	13
	4.2 Collective dose commitment	14
	4.3 The *de minimis* concept	15
	4.4 Scheduled quantities	16
	4.5 Occupational hazards in uranium mining	17
	4.6 Female atomic radiation workers	18
5.	IMPLEMENTATION OF RADIATION PROTECTION PRINCIPLES	19
	5.1 Role of Atomic Energy Control Board	20
	5.2 Role of Department of National Health and Welfare	20
	5.3 Role of the provinces	21
	5.4 Responsibility of the licensee	22
	5.5 Responsibility of the worker	22
6.	REFERENCES	24
GLOSSARY		29
APPENDIX A.	History of radiation protection in Canada	34
APPENDIX B.	Canadian participation in ICRP and UNSCEAR	54
ACKNOWLEDGEMENTS		56

BASIC PRINCIPLES OF RADIATION PROTECTION IN CANADA

1. BIOLOGICAL EFFECTS OF RADIATION

1.1 Introduction

Radiation protection is concerned with the maintenance of safe conditions for human activities involving the use of various sources of ionizing radiation*.

Over the past two centuries, many different types of radiation (ranging from radiowaves and microwaves through infrared, visible and ultraviolet to X- and gamma-rays) were discovered to exist in nature and practical applications of these discoveries have become widespread in technologically developed societies. In this document, the term radiation will, however, be used to designate ionizing radiations only. Ionizing radiations include X-rays*, gamma-rays* and various subatomic particles moving at high speed. They are called "ionizing" because the physical methods first used to measure these radiations depended on the ability of ionizing radiations to dissociate gaseous molecules into ions. Ionizing radiations can also damage biological systems.

Human beings, and indeed all living organisms, have always been exposed to ionizing radiation. Current average levels of exposure in North America (1,2) are summarized in Table 1. Although these exposures vary considerably from one person to another (particularly in the case of medical exposures) and from one part of the country to another, the average total dose rate*, in standard international units, is about 3 millisieverts* (3 mSv) per year, of which two-thirds is from natural sources. At these levels of exposure, the probability of harmful biological effects of radiation is so small relative to normal "background" disease rates that these effects cannot be directly measured or detected (1). Estimates of potential harm have been be made by extrapolation from known effects of higher radiation doses* in the region of 1000 mSv (1 Sv) (1-3).

1.2 Stochastic effects

Current internationally-accepted estimates of the probability of serious harm to humans resulting from exposure to low doses of ionizing radiation are shown in Table 2. A historical review of other estimates produced by various scientific committees can be found in Appendix A. These probabilities are expressed per unit of radiation dose to the whole body. For purposes of radiation protection, it is assumed that the probability of inducing the particular biological effects listed in Table 2 is directly proportional to the total radiation dose received at low dose rates and that there is no "safe" or threshold dose* of radiation below which these effects will not be produced (Fig. 1). Biological effects which follow this pattern are termed "stochastic"* effects (3).

[**Footnote*: Definitions of these terms and others marked with an asterisk when first used in the text can be found in the glossary.]

Table 1

Approximate average annual doses to North Americans of ionizing radiations from various sources (1,2)

Source	Effective dose equivalent* in mSv per year
Natural sources:	
Cosmic	0.3
Terrestrial	0.3
Internal natural radionuclides	0.4
Inhaled radon daughters	1. - 2.
Man-made sources:	
Medicine and dentistry	0.5 - 1. [a]
Fallout from weapons testing	0.001 - 0.03
All other sources combined	0.1
TOTAL	about 3.

[a] A recent review suggests that average annual doses from the use of X-rays and radioactive tracers in medical diagnoses might be as high as 2 mSv per year in Canada (4). Data in the above table include some values provided in NCRP Report No. 93 (1987) entitled Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States.

There is good biological evidence to support this latter assumption in the particular case of radiation-induced genetic* changes. Experiments with bacteria, yeast, certain plants and insects have provided conclusive evidence for a linear, non-threshold relationship between the probability of induction of genetic changes and total accumulated radiation dose at low doses of radiation (7). Deviations from this simple relationship are frequently observed in biological experiments with high radiation doses delivered at high dose rates, but these deviations will not be considered in detail here because they are of little relevance to radiation protection under normal circumstances of exposure to low doses.

There is no decisive proof for any radiation-induced hereditary changes in humans; however, the available data are compatible with a linear, non-threshold dose-response relationship for radiation-induced genetic changes in other mammals (8) as well as in humans (9). More importantly, there is no biological evidence to indicate that the basic mechanisms for induction of genetic changes in DNA* (the carrier of inherited information for all life processes) in humans are any different from those in other living organisms, or that the linear dose-response relationship which has been demonstrated for radiation-induced genetic changes in lower organisms should not be equally valid in humans.

Table 2

Estimates of biological risks due to whole body exposure of human populations to low doses of radiation (see 2,3,5,6)

Biological effect	Predicted number of effects after exposure of 100 000 persons in the general population to 1 mSv each	
Fatal cancers	1.3	[a]
Curable cancers	1.3 - 2.3	[b]
Genetic disorders summed over all generations of descendants of the exposed population	1.6	[c]
Severe mental retardation due to exposures *in utero**	0.1	[d]

[a] A recent ICRP statement from the September 1987 meeting of the ICRP in Como indicates that estimates of the risk of fatal cancers induced by ionizing radiation may be increased by about 2-fold as a result of recent revisions of estimated doses from the atomic bomb explosions at Hiroshima and Nagasaki in 1945.

[b] The upper value in this range includes a large proportion of curable skin cancers which cause less severe medical problems than most other types of cancer (5). It is uncertain whether or not induction of skin cancer is directly proportional to radiation dose at low doses (6).

[c] The risk of genetic disorders in all progeny when both parents are exposed prior to conception of children is about 4 in 100,000 per mSv (2,3). This value is multiplied by 0.4 (3) to allow for the fact that approximately 60% of the general population is past the average age of reproduction (average age of parents at childbirth about 30 years and average life expectancy is about 75 years) (5), giving the value of 1.6 in 100,000 shown in the table. In the case of occupational exposure, only the risk to the children and grandchildren (which is half the total risk for all generations) is considered as part of a worker's occupational risk, giving a risk factor of 0.8 in 100,000 if both parents are irradiated, or 0.4 in 100,000 for each exposed worker.

[d] *The risk per 100 000 mothers exposed during pregnancy is taken to be 10 per mSv* (6); this value is multiplied by 0.01 to allow for the 2% probability that a woman in the general population is pregnant at any given time, and for the fact that half the general population is male.

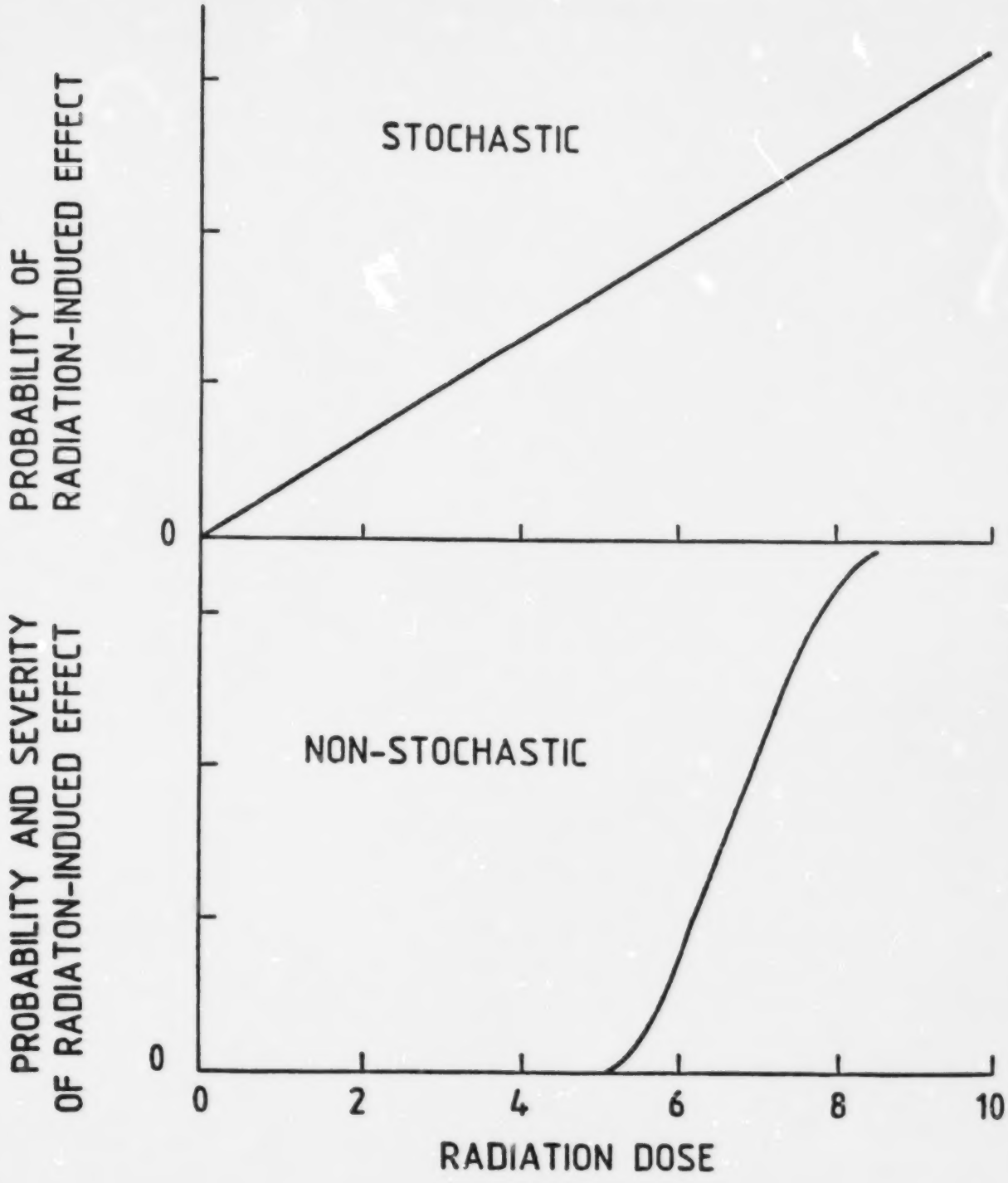

Figure 1. Schematic representation of dose-response relationships for stochastic and non-stochastic effects of ionizing radiation. Both the vertical and horizontal scales are given in arbitrary units.

It has been repeatedly demonstrated that high radiation doses induce cancers* in humans (1,2). However, there is no conclusive proof of a linear, non-threshold dose-response relationship for induction of cancers by low doses of radiation. The presumptive evidence in favour of linearity includes: [i] indications that at least one stage of cancer induction involves alterations in DNA structure similar to those responsible for genetic changes (6,10), [ii] evidence that relatively low doses of radiation can increase the incidence of certain types of cancer in humans and in experimental animals (2,11), and [iii] evidence that the increase in certain types of cancer after exposure to moderate doses of radiation is compatible with a linear, non-threshold dose-response relationship (6). *The assumption that the increase in all types of radiation-induced cancer is directly proportional to accumulated radiation dose at low doses and low dose rates is therefore a prudent and reasonable hypothesis for purposes of radiation protection.*

Although the mechanisms responsible for induction of severe mental retardation after irradiation in utero* are less well understood, the limited data available for humans seem to be compatible with the linear, non-threshold dose-response relationship (6). The epidemiological data are also consistent with a threshold dose of a few tens of mSv. For the former reason, it is considered prudent to include this effect together with induction of hereditary changes and of cancers (Table 2) among those for which the incidences are assumed to increase in direct proportion to radiation dose at low doses (6), at least until further relevant data become available. Further discussion of this topic is found in Section 4.6.

The accepted estimates of the probabilities of induction of stochastic effects (Table 2) are known to be subject to appreciable uncertainty (1,2). For example, one scientific report (1) indicates that the probable numbers of genetic disorders produced in the children of exposed parents could be four times lower or four times higher than the mean value adopted in another report (2). Similarly the range of uncertainty for risk of induction of lung cancers by inhalation of radon daughters* is thought to be about three-fold in either direction from the recommended value (12). The risk of induction of fatal cancers after whole body exposure to radiation is also associated with appreciable uncertainty. The most probable values lie in a range from about 2-fold greater to 2-fold smaller (1) than the generally accepted mean (3) but an even greater range of uncertainty arises when other models are used to extrapolate from known effects of high radiation doses to predicted but non-detectable effects of low doses at low dose rate (1).

Other variables are associated with the age and sex of the exposed persons. For example, the risk of radiation-induced breast cancer is much higher for women than for men. The effects of age at exposure probably vary for different types of radiation-induced cancer (1,2). The risk of radiation-induced hereditary disorders in the children of exposed persons is thought to be higher for exposures of the male parent than of the female parent (2).

Undoubtedly, as with diseases in general, there are also variations in susceptibility to radiation-induced effects between one individual and another in the general population (1).

All the estimates of radiation-induced stochastic effects given in Table 2 are subject to continuing review by various national and international scientific committees appointed for this purpose. *For purposes of radiation protection, it is however essential to provide risk estimates* which do not either grossly exaggerate or underestimate the potential biological hazards to the average person in the exposed population.* Gross exaggeration of these risks could result in harm to society by unwarranted diversion of a large portion of limited societal resources away from protection against other risks. Gross underestimation of the stochastic risks of radiation could result in inadequate protection of radiation workers and of the general public. The numerical values given in Table 2 are currently accepted estimates of the average stochastic risks.

1.3 Non-stochastic effects

Other biological effects of radiation, for example, skin burns, cataracts, sterility, life shortening other than that due to cancer induction, and death, are produced only by high doses of radiation (Fig. 1). These "non-stochastic"* effects are not observed when the radiation dose is below a threshold characteristic for each particular non-stochastic effect. In most cases (except perhaps for the lens of the eye), a dose rate of 500 mSv per year is below the threshold at which any non-stochastic effect might be produced (1-3). The threshold for induction of non-stochastic effects is usually in the range of a few sieverts to a few tens of sieverts when the radiation dose is delivered in a short period of time (1,2). However, induction of non-stochastic effects, in contrast to stochastic effects, is highly dependent on dose rate. At low dose rates, non-stochastic effects are not produced by radiation because any small fraction of cells killed in a tissue are replaced during the normal turnover and renewal of cells in that tissue.

1.4 Goals of radiation protection

The aim of radiation protection, as stated by the International Commission on Radiological Protection (ICRP)* and endorsed by the Advisory Committee on Radiological Protection (ACRP)* in Canada, is to prevent all detrimental non-stochastic effects (i.e., to ensure that skin burns, etc, never occur) and "to limit the probability of stochastic effects to levels deemed to be acceptable" (3). Acceptable levels are normally considered to be those which ensure that the health risks involved in radiation work do not exceed those in other safe industries* and that risks to the general public are in the low range of other risks to which members of the public are exposed. Potential effects on children and grandchildren of exposed persons as well as potential effects on the persons themselves are all taken into account.

Radiation protection is thus concerned with the "protection of individuals, their progeny and mankind as a whole" against the harm* that might result from unwarranted exposure to ionizing radiation (3). A basic objective is to ensure that exposures to man-made sources of radiation are kept low in order to ensure maximum net benefit* to society from the practical application of various sources of ionizing radiation in industry, in research and in medical practice*.

The principles may be stated more formally in terms of the trade-off between benefit and potential harm, and of fairness to individuals.

A historical review of the development of concepts in this area is given in Appendix A. The remainder of this document is intended to give a more detailed outline of the most important principles in radiation protection in Canada at the present time. This will include further discussion of the concepts of "acceptable" levels of exposure and of justification of practices involving radiation exposure.

2. INTERNATIONAL AGENCIES

2.1 General overview

Radiation protection in Canada is part of societal effort to increase general health and prosperity, and is closely associated with an international scientific and regulatory endeavour in which all industrialized countries participate. Recommendations for protection are based on a large amount of relevant scientific knowledge which has been accumulated over the years, in particular over the past forty years. These recommendations and regulations have evolved (see Appendix A) as new research data on critical questions became available; new recommendations usually require the consensus of a group of experts from a variety of scientific disciplines who have been brought together to consider the impact of new data and new conclusions that might be derived from these data. Canadian scientists from a variety of organizations have participated in the work of international agencies concerned with radiation protection.

International agencies have played three important roles in radiation protection:

(i) ORGANIZATION OF SCIENTIFIC CONFERENCES at which scientists from various countries meet to present new information to an international audience. The *International Society of Radiology* has organized quadrennial meetings concerned with medical applications of radiation since the 1920's. The *International Radiation Protection Association* was established in 1966 to fulfill a similar function in the more specific area of protection against harmful biological effects of various sources of ionizing (and non-ionizing) radiations. The *International Congress of Radiation Research* organizes similar scientific conferences every four years dealing with fundamental aspects of the interactions of radiation with living organisms and other materials.

The *International Atomic Energy Agency* (IAEA) was established in 1957 by treaty between 82 countries (with assistance from the United Nations) to promote peaceful uses of atomic energy on an international scale. One of the functions of the IAEA has been to sponsor numerous scientific conferences on a wide variety of topics concerned with peaceful uses of radioactive materials; many of these conferences are co-sponsored by the World Health Organization (WHO) and in some cases, depending on the topic, by the International Labour Organization. Proceedings from all the above conferences are published and are available from the sponsoring agency.

(ii) CRITICAL REVIEW OF PUBLISHED SCIENTIFIC DATA on the levels of ionizing radiation to which people are exposed and the biological effects of radiation on human beings. A key role in this area is played by the *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), established

in 1955 mainly because of widespread concern at that time about possible effects of fallout from atmospheric testing of nuclear weapons. This committee publishes an extensive document of 300-400 pages every 3 to 5 years in which recent data on radiation exposure from a wide variety of natural and man-made sources are reviewed together with data on the biological effects of radiation.

Parallel reviews are carried out in the USA by the *Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation* (BEIR) and by the *National Council of Radiation Protection and Measurements* (NCRP). The latter committees are primarily national in scope but from time to time include invited experts from Canada and other countries. The general conclusions of these scientific reviews are usually rather similar, which is not too surprising since the scientific data available to the various committees are identical. More general reviews of the health effects of exposure to radiation from various sources are carried out on an irregular basis by a variety of organizations including the World Health Organization, the American Medical Association, the British Medical Council, the National Radiological Protection Board (Britain), the Atomic Energy Control Board of Canada and other agencies. These agencies are usually concerned with the implications of the more detailed scientific reviews produced by UNSCEAR and the BEIR committee.

(iii) RECOMMENDATIONS ON DOSE LIMITS and practical principles for limiting the exposure of workers and the public to various sources of ionizing radiation. A key role in the recommendations has been played by the *International Commission on Radiological Protection* (ICRP). The recommendations of this body carry no legal weight and must be interpreted and translated into legal regulations by responsible national authorities such as the Atomic Energy Control Board of Canada (AECB) in the case of nuclear facilities and radioactive materials or provincial authorities in the case of X-rays. However, Canadian regulations for radiation protection have, with a few minor adaptations to specific Canadian requirements, conformed with ICRP recommendations. The latter organization and the basic principles of its current recommendations will therefore be described in more detail in subsequent sections. Other recommendations, which are usually similar to those of the ICRP, are issued by the NCRP in the U.S.A.

The IAEA has further provided a series of documents (for example, the Basic Safety Standards for Radiation Protection) concerned with safety standards, procedures and recommendations. In general, these documents are concerned with implementation of ICRP recommendations in the field of nuclear energy. Both the IAEA and WHO have issued recommended guidelines for action in the event of nuclear emergencies. The *Nuclear Energy Agency* (NEA) of the Organization for Economic Co-operation and Development was, like the IAEA with which it works in close collaboration, established to promote the orderly development of the uses of nuclear energy for peaceful purposes; the NEA includes representatives from western European countries plus Australia, Canada, Japan, New Zealand and the U.S.A. This agency organizes workshops on various practical matters associated with nuclear energy and issues guidelines and recommendations for these areas.

All the above agencies plus other national agencies contribute valuable information to the quantitative assessment of the biological effects of ionizing radiation, recommendations on dose limits and on practical methods for reducing radiation exposures below the recommended upper limits.

2.2 The ICRP

The ICRP was established in 1928 and reorganized in 1950 after a lapse of several years of inactivity during and immediately following World War II. The main Commission is composed of a chairman and not more than twelve other members, and is responsible to the International Society of Radiology. Selection of members must be approved by the executive committee of the International Congress of Radiology; this congress is a scientific meeting of medical radiologists which has been held every four years (excluding the years during and immediately following the 1939-45 war) since 1924 under the auspices of the International Society of Radiology.

Members of the ICRP are "chosen on the basis of their recognized activity in the fields of medical radiology, radiation protection, physics, health physics, biology, genetics, biochemistry and biophysics" (3). In order to avoid a self-perpetuating membership but to ensure some continuity, not less than three but not more than five members of the Commission must be changed at each International Congress of Radiology. The ICRP has established four committees to deal with specific topics (radiation effects, internal exposure, external exposure, and application of the commission's recommendations) in radiation protection, and much of its work is performed by ad hoc task groups, by means of which the ICRP has been able to call on the services of a large number of appropriate experts from around the world who are not members of its committees. Canadian participants in the work of ICRP are listed in Appendix B.

Through grants of money made to it by various interested national and international organizations, such as the Atomic Energy Control Board and the Department of National Health and Welfare in Canada, the Commission has been able to support the travel costs of some of the individuals attending the meetings of its committees and task groups. However, most of its effort depends on voluntary support by the individual institutions which send invited scientists to these meetings (3). The ICRP is concerned with protection against undue exposure to ionizing radiation from all sources including medical X-rays, but does not attempt to deal with protection against non-ionizing radiations.

The Commission works closely with the International Commission on Radiological Units and Measurement (ICRU) in establishing recommended units of radiation dose. The ICRU, like the ICRP, was established by the International Society of Radiology and is responsible to that society. Both Commissions consist of eminent scientists from a variety of countries around the world and are independent of national governments.

3. INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS

3.1 Justification of practices

The first principle in the system of dose limitations recommended by the ICRP is that "no practice shall be adopted unless its introduction produces a positive net benefit" (3). Expressed in general terms, the basic concept is that the balance between collective benefit and collective harm from a specified activity should be favourable. This principle, which is often known as "justification", has been applied in various ways in Canada and other countries. For example, the indiscriminate use of X-ray machines for fitting of shoes and the use of

radioactive materials to produce luminous toys for children have been banned because little or no real benefit resulted while there was an appreciable potential for harm. The use of X-rays and radioactive materials for the medical diagnosis and treatment of various diseases is generally considered to be justified by its benefit to the health of individual patients, although certain applications are challenged from time to time by medical researchers.

Other applications such as production of electricity in nuclear power generating stations could also be justified in terms of health benefits alone, since the detrimental health effects associated with production of the energy required by an industrialized society are orders of magnitude smaller than the health benefits which accrue to all members of this society (13). However, the major factors which are usually considered in the justification of nuclear power include economics, future energy needs, present and future availability of various sources of energy and raw materials in different countries.

Responsibility for decisions in these areas does not rest with regulatory agencies alone but also with federal and provincial governments. These decisions must be made in the context of many different social factors including health effects of radiation. The function of expert groups such as ICRP (and in Canada, for example, the Advisory Committee on Radiological Protection) is to provide reliable information and recommendations concerning health effects of radiation so that informed decisions on justification can be made.

3.2 Optimization of radiation protection (ALARA)

ICRP has further recommended that "all exposures shall be kept *as low as reasonably achievable* [ALARA], economic and social factors being taken into account" (3). This second recommendation is also known as "optimization" of radiation protection and is more commonly referred to as the "ALARA"* principle. The principle that radiation exposures should be kept small has always been a feature of ICRP recommendations. Emphasis on formal optimization has, however, increased in recent years.

The major principle in optimization of radiation protection is a balancing of the cost of dose reduction against the potential health benefits of this reduction. Societal considerations are involved, since there is some appropriate level of expenditure on radiation safety, beyond which society might harvest greater net benefit if the resources were invested in other areas of safety or health improvement or invested to increase prosperity. Optimization results in maximizing the net collective benefit for society from a given undertaking involving the use of ionizing radiation.

One procedure for deciding what is reasonably achievable involves cost-benefit analyses (3,14). Additional judgements on the importance of factors such as distribution of individual doses, aesthetics, employment and aversion to risk may be included by using multi-criteria methods of decision-making (14).

Various attempts to make cost-benefit analyses more quantitative have resulted in assignment of monetary values to the potential health benefits of reduction of a unit of collective radiation dose. In essence, this amounts to assigning a dollar value to the amount of effort that it is reasonable for a society to spend to reduce the statistical probability of a premature death or other dele-

terious health effect from any known or probable cause. Although there is still some controversy as to the best dollar value to be used in these cost-benefit analyses, this approach can be useful in *selecting an optimum solution from a variety of proposed radiation protection options*. The values used by ICRP in its numerical examples of cost-benefit analyses are in the region of ten U.S. dollars (1983 value) per person-mSv (14).

The IAEA has recommended $3 per person-mSv as a reasonable international minimum, with the suggestion that higher values might be considered more appropriate for affluent countries (24). The value selected should apply equally to persons living within the country and to all other persons around the world who might be affected by radioactive releases from the country in question (24).

3.3 Individual dose limits

In order to limit restrict potential harm to the health of individual radiation workers so that their risks are no greater than those experienced by individuals working in other industries, the ICRP has recommended maximum permissible doses for individual persons (3) over and above natural background radiation and medical uses of radiation. These maximum doses are 50 mSv per year for radiation workers and 5 mSv in any given year for individual members of the general population. A principal limit of 1 mSv per year averaged over the whole of life (i.e., over about 75 years on average) has been recommended (3,15) for individuals in the general population, in order to reduce the maximum probability of harm to about 1 in 10^5 per year. Special restrictions are recommended in the case of pregnant radiation workers to protect the developing child *in utero* (see section 4.6). Protection of the general public against radon daughters represents a separate problem which has not yet been resolved; current regulatory limits in Canada would be equivalent to about 10-14 mSv per year to individual members of the general public.

The recommended dose limits are intended to apply to the occupational exposures received by radiation workers in all fields, whether in medicine, in mining, in nuclear facilities, or in other industries. Dose limits for individuals in the general public do not apply to exposures from natural sources or to exposures received by patients for the purpose of medical diagnosis or therapy. Exposures of patients should however be kept as low as reasonably achievable to any extent that would not compromise the medical benefits to the patient (3).

Using the quantitative risk estimates provided by the ICRP (3), the sum of the potential risks of radiation-induced fatal cancer (1.3×10^{-2} per mSv) in exposed workers and of radiation-induced genetic disease (0.4×10^{-2} per mSv) in the children and grandchildren of exposed workers would be equivalent to an annual risk of 8 per 10 000 workers at the dose limit of 50 mSv per year for radiation workers. However, average exposures in many large occupational groups operating under the constraint of the 50 mSv limit have generally been in the region of 5 mSv per year (3). The potential radiation risk at this level of average exposure is close to one occupational fatality per 10 000 workers per year, a risk level achieved by industries which are currently considered to be "safe industries" (Table 3). The chance of death due to an occupational fatality during 50 years at work in an industry with an average occupational fatality rate of one per 10 000 workers per year is currently about 40 times

smaller than the chance of death from all other causes between age 18 and age 65. The ICRP has recommended that long-continued exposure of a considerable proportion of the workers at or near the limit of 50 mSv per year "would only be acceptable if a careful cost-benefit analysis had shown that the higher resultant risk would be justified" (3).

Table 3

Occupational fatality rates among compensable workers in Canada 1976-1980 [a]

Industry	% of all compensable workers employed	Occupational fatalities per 10 000 workers per year
Finance	5.6	0.16
Service	29.8	0.25
Trade	17.1	0.45
Agriculture [b]	1.6	0.84
Public administration	7.3	0.91
Manufacturing	21.2	0.93
Transport	9.4	2.45
Construction	5.3	3.7
Mining	1.7	9.4
Forestry	0.8	11.7
Fishing	0.1	20.0

[a] Includes deaths arising out of occupational illnesses or an earlier disabling injury. Does not include deaths among the 20% of all workers in Canada who were not covered by workers compensation arrangements. These data were compiled by the Occupational Safety and Health Branch of Labour Canada.

[b] Data for agricultural workers are not directly comparable with those for other countries such as the U.S.A. or U.K. because of differences in the categories of workers included in the compilation.

In the case of irradiation of part of the body, a system of limits based on the "effective dose equivalent"* is recommended (3). The tissues of the body do not all receive the same dose when persons are exposed to "soft" (low energy) X-rays, beta-rays or fast neutrons from external sources, to inhaled radon daughters or to many other inhaled or ingested radionuclides. To allow for non-uniform distributions of dose, each tissue is assigned a weighting factor which reflects the probability of induction of a fatal cancer or genetic disorder (in the children and grandchildren of the exposed person) due to irradiation of that tissue (3). The sum of the weighting factors for all tissues of the body is 1.0. The term "effective dose equivalent" is used to designate the sum of the

dose equivalents to each tissue, each multiplied by the appropriate weighting factors for that tissue. Thus the total risk of induction of fatal cancers and genetic disorders following an effective dose equivalent of 1 mSv should be identical to that resulting from a whole body dose of 1 mSv.

An overriding limit of 500 mSv per year to any single tissue (or 150 mSv per year to the more sensitive lens of the eye) is applied to prevent development of any non-stochastic effects due to occupational exposures of radiation workers (3). The non-stochastic limit is reduced ten-fold for members of the general public to allow for the fact that the general population may be exposed over their whole life (rather than during their working years only), for the fact that it includes persons with potentially greater radiosensitivity than average, and for the fact that individual members of the public are generally not monitored directly for radiation exposures as are individual radiation workers.

4. APPLICATION OF RADIATION PROTECTION PRINCIPLES IN SPECIFIC AREAS

The dose limits of 50 mSv per year for individual radiation workers and 5 mSv per year for individual members of the general public have been widely accepted in Canada as in most countries as the basis for regulations and will not be discussed in further detail. Some specific areas in radiation protection which have received considerable attention from scientific advisory groups in Canada are noted below.

4.1 ALARA

The radiation doses received by most categories of radiation workers in Canada have on average been well below the legal limits (17). Most groups of workers dealing with X-rays or with radioactive materials receive average annual doses less than one-tenth of the current annual dose limit; the most highly exposed groups (e.g. reactor operators and mechanical maintenance personnel) in nuclear power stations receive on average less than one-quarter of the limit. Exposures of the general public in the vicinity of nuclear power stations have rarely exceeded 0.05 mSv per year or one-hundredth of the maximum limit (5 mSv per year) recommended by the ICRP for individual members of the general public. Earlier problems with high radiation exposures of underground uranium miners (18) have diminished but are still a subject of continuing concern and research.

Despite the achievement of low occupational doses in many areas of radiation protection, some risk is still assumed to exist. Proposed AECB regulations (19) governing the use of radioactive materials and the operation of nuclear facilities in Canada include a requirement for every licensee* to "establish and implement ... measures to maintain doses of radiation received by any person or group of persons as low as reasonably achievable, taking into account relevant social and economic factors". The intention is to ensure a balance between the desirability of reducing radiation doses and the resulting cost of bringing about such reductions (20). Reduction of individual doses is not the only goal; more important is reduction of the collective dose* (i.e. average individual doses multiplied by the total number of exposed individuals; see section 4.2) from a given practice. The average collective dose per unit of power produced has already been decreased by greater than 10-fold in more recently designed nuclear power stations in Canada (21). A practical ALARA process must generally recognize past achievement in any given context.

The ALARA process should only be applied to a choice between alternative methods of protection for the same practice (22,23). If a practice is justified because it does more good than harm to society, it would be a misapplication of ALARA to attempt to restrict the total extent of that practice as a method of reducing collective dose (23). For example, it is generally considered that people in many of the less prosperous areas of the world would benefit from more rather than less diagnostic radiology (23). The ALARA process has been more correctly applied in efforts to minimize the doses received by patients in diagnostic radiology without loss of any of the health benefits of proper medical diagnoses.

Cost-benefit analysis has been applied to possible measures for control of naturally-occurring levels of radon daughters in homes across Canada (25) as well as of man-made sources of radiation. The ACRP has further suggested that the ALARA process should be extended to include all occupational hazards, not simply radiation hazards; this suggestion is particularly relevant in industries such as underground uranium mining where the incidence and severity of occupational accidents are relatively high.

4.2 Collective dose commitment

A collective dose is the sum of the individual doses for all exposed individuals. The unit of collective dose is the person·Sv. For example, there are currently about 25 million people living in Canada, each exposed to about 2 mSv per year from natural sources (Table 1); the annual collective dose from natural sources to the population of Canada is therefore about 50 million person·mSv or 50 thousand person·Sv.

Human activities involving the production of radioactive* materials with long half-lives* necessitate consideration of the potential health effects of radiation received from these materials in the future. This consideration is of particular importance in the management of radioactive wastes. The term "collective dose commitment" is used to define the collective radiation dose to all persons summed over the whole earth and all time. Similar quantitative concepts have not yet been developed for the management of non-radioactive but potentially noxious wastes.

If the assumption of a non-threshold dose-response relationship for radiation effects is correct, a summation over all time and space is necessarily involved in the balancing of a given unit of social benefit against the collective harm associated with the production of that unit of benefit. Given our present state of knowledge, it is generally not possible to sum collective benefits to humanity from a given current practice over all time and space. Neither is it possible to provide precise scientific estimates of potential collective harm to humanity from any given practice summed over all time and space. For those reasons, it seems practical and realistic to establish appropriate cutoffs in the summation processes.

A cutoff or integration limit in the summation over space is generally regarded as acceptable, provided the distance to the cutoff is sufficient to ensure that the true summation to the total global population is not grossly underestimated. For example, a summation of doses from airborne releases of short-lived radionuclides* such as radon-222 (half-life 3.8 days) to the boundary of Canada plus

the continental USA would not seriously underestimate the collective dose to the whole population of the earth. However, the same procedure might underestimate global doses by a large factor in the case of airborne releases of long-lived radionuclides such as carbon-14 (half-life 5730 years). In the latter case, the collective dose would be more appropriately summed for the whole population of the earth.

The choice of cutoff for the corresponding summations over time represents a more difficult problem, especially for those nuclides with very long half-lives. There is almost universal mistrust of the practical significance of results from theoretical calculations of dose commitments and harm commitments extending millions of years into a distant future that becomes increasingly unforeseeable with advancing time. Various alternatives have been proposed.

a) There are those who favour short-term summation only, for example over something like 100 years as representing the foreseeable future (20). This is based on the assumption that the present generation should bear the primary responsibility for its safety and that of its children and grandchildren. Improvements in public health and the technical capabilities of our society over the past 100 years have been so dramatic that it is difficult to foresee what this society might be like even 100 years from now.

b) Others (26) favour an intermediate time period for summation, for example 10 000 years. This is roughly equivalent to the recorded or documented history of man (if one includes cave drawings among the documentation); the 10 000 years might also be viewed as representing roughly the interval between glaciations in Canada.

c) Yet a third kind of solution involves a "discounting" of the estimates of those components of dose commitment and harm commitment pertaining to the more distant future. There is no general agreement on discounting procedures (22).

The importance of ALARA would be downgraded if no attempt were made to estimate the potential collective dose commitment, summed over all space and time, which might result from the production of a given unit of collective benefit. This estimate can be valuable, for example, in attempting to decide which of the various options available might be logically selected for the management of long-lived radioactive wastes. However, the practical value of this summation could become invalid if too much weight were given to extremely uncertain dose contributions in the distant future (24). Predictions over tens, hundreds or even thousands of years may be useful guides as to the consequences of present actions, but predictions over hundreds of thousands or millions of years are generally considered to be of very little practical relevance (2).

4.3 The *de minimis* concept

All materials in the world, including the soil and the tissues of the human body, contain small amounts of radionuclides. Since the purpose of radiation protection regulations is to ensure a high standard of relative safety, rather than to control or interdict all human activities, it is reasonable that possession of small quantities of radioactive material has traditionally been of no

concern and therefore exempt from regulation. There is, however, no consistent basis for past licensing exemptions. For this and other practical reasons, application of a "*de minimis*" concept is being considered (27). Conceptually, a "*de minimis*" dose is one for which the associated health risk is so small that efforts to regulate the source of that dose might be considered to constitute an undue expenditure of societal resources for an insignificant benefit in health protection (27).

The *de minimis* dose rate of 50 microsieverts* (0.05 mSv) per year proposed by AECB for individual members of the general public (27) corresponds to about one-fortieth of average annual exposures from natural sources. The ICRP has similarly suggested exemption rules for individual dose rates in the region of 0.01 to 0.1 mSv per year, depending on the number of exempted sources to which an individual might be exposed (28). Below this criterion, there would be no further need for radiation protection concern as relating to individuals (28).

The collective dose resulting from dispersal of small amounts of long-lived radionuclides in the biosphere might be considered too large to be negligible from a societal point of view, even if dose rates to individuals were very low. For this reason, *de minimis* collective dose rates should also be considered (27). Thus, a given source could not be considered *de minimis* unless it met both the individual and collective dose rate criteria.

Some other factors to be considered in establishing *de minimis* values for collective dose rates include the possibility of large numbers of activities in many countries around the world, each resulting in very small doses to people in Canada. Moreover, doses from continued releases of long-lived radionuclides such as carbon-14 would be cumulative. For this reason, records should be kept of the various contributions to the collective radiation dose received by the population of Canada and long-term forecasts of trends should be developed for consideration by appropriate authorities (3). To date, the best source of information of this kind has been the reports prepared by the United Nations Scientific Committee (2). Periodic review of the *de minimis* concept, associated risk estimates and of the criteria for exempted sources by appropriate national authorities would be useful.

One of the main objectives of radiation protection is to ensure that the collective harm to society, from a given activity involving radiation sources, will be as small as possible in comparison with the collective benefit from that activity. Where a collective dose can be reduced cheaply and in a cost-effective manner, this should be done regardless of whether or not that dose exceeds a *de minimis* criterion.

4.4 Scheduled quantities

The concept of scheduled quantities is used by the AECB in various ways for licensing activities involving the use of radioactive materials in Canada. The criteria for a scheduled quantity are (a) that possession and indiscriminate use of one scheduled quantity would not result in an annual dose to any individual from external radiation in excess of 5 mSv to the whole body, 50 mSv to the skin of the whole body, or 500 mSv to limited areas of the skin which are less than about 2 or 3 percent of the surface area of the whole body, and (b) that inges-

tion or inhalation of one scheduled quantity would not result in a committed dose* in excess of 5 mSv (29). A variety of exposure scenarios is considered in the calculation of the amount of any given radionuclide that constitutes a scheduled quantity (29).

Scheduled quantities are listed in the proposed amendments to the Atomic Energy Control Regulations for 102 radioactive nuclides (19). In cases where a specific radionuclide is not listed, the scheduled quantity is 10^4 becquerels if the atomic number* of the nuclide is not greater than 81, and 10 becquerels if the atomic number is greater than 81.

Activities are exempt from the requirement to obtain a license from the AECB if the concentration of radioactive substance is not greater than one scheduled quantity per kilogram, or alternatively if the source does not contain more than one scheduled quantity and not more than ten scheduled quantities per year are required by a potential licensee (19). The complexity of radiation protection programs required under the terms of a radionuclide license issued by AECB is determined by the number of scheduled quantities possessed.

The concept of scheduled quantities thus plays an important role in radiation protection in Canada. To put some of these proposed numbers (19) into perspective, it might be noted that the average concentrations of potassium-40, uranium-238 and thorium-232 in soil (2) correspond to about 0.04, 0.1 and 2.6 scheduled quantities per kilogram, respectively.

There is at present no direct relationship between proposed scheduled quantities and *de minimis* dose-rates for man-made sources of radiation; a relationship of this type would be useful, taking into account the relevant exposure pathways and other factors involved.

4.5 Occupational hazards in uranium mining

Mining in general is a relatively hazardous occupation due to the high rate of occupational accidents (Table 3), and uranium mining is no exception. Uranium miners re in addition exposed to occupational radiation hazards, notably inhalation of short-lived radon daughters. In some uranium mines, dust-induced diseases such as silicosis are also a hazard. Ideally workers should be protected from total occupational risk (radiological as well as non-radiological) in the most cost-effective manner. It is therefore appropriate to take non-radiological as well as radiological hazards into account when implementing the recommendation to keep occupational risks to uranium miners as low as reasonably achievable (30).

In so far as radiological protection of uranium miners is concerned, the 1959 ICRP recommendations (31) indicated that 4 WLM* of inhaled radon daughters per year would be roughly equivalent in health hazard to the maximum permissible dose of 50 mSv whole body radiation per year for radiation workers. This recommended limit might be compared with estimated exposures of 20-2000 WLM per year for full-time workers in some of the early uranium mines in Canada in the 1940's and 1950's (18,32).

The system of "effective dose equivalent" (see section 3.3) for estimation of health risks from partial body irradiation resulting from internal radionuclides, such as inhaled radon daughters, was established in 1977 (3) and is

now generally accepted in most countries. Maximum permissible exposures were to be limited on the basis of the sum of exposures to all occupational sources of radiation (3). In the case of uranium miners, this implies that, instead of radon daughters alone being limited, the sum of the effective dose equivalents from external gamma-rays, inhaled radon daughters, thoron daughters and ore dusts containing long-lived radionuclides should be limited so as not to exceed a total effective dose equivalent of 50 mSv per year. Annual limits on intake of radon and thoron daughters and of long-lived radionuclides which might be present in ore dusts have been calculated (12,33). In the case of radon daughters, this annual limit would be equivalent to 4.8 WLM per year (12). The net effect of these recommendations is considerably more restrictive in limiting radiation exposures in Canadian uranium mines than that resulting from implementation of the 1978 Canadian regulations (34).

Practical considerations for the reduction of radiological hazards to mine workers have been noted by the IAEA and the ICRP (33). The risks of lung cancer attributable to inhalation of radon daughters are still being evaluated by experts in various countries, and the accuracy of the estimates of these risks continues to improve as more extensive data become available. On the basis of epidemiological data alone, the average radiological hazard from 4 WLM of inhaled radon daughters would appear to be somewhat greater than that attributed to 50 mSv of whole body radiation (35). Similar values for the risks of exposure to radon daughters can be derived from a recent reanalysis of epidemiological data by ICRP (36). All of these estimates of risk are subject to a considerable range of uncertainty. Despite these uncertainties, the best approach to occupational protection of uranium miners is continued emphasis on the ALARA principle for reduction of radiological hazards and on the reduction of other, non-radiological hazards associated with mining.

4.6 Female atomic radiation workers

The possibility of foetal harm, notably defective development of the central nervous system, resulting from irradiation of pregnant women was recognized as early as 1945 in the Canadian Atomic Energy Project (32). Employment of pregnant women as atomic radiation workers was prohibited by Canadian regulations in Canada in 1960. In 1964, the ICRP recommended a maximum permissible dose of 13 mSv per 3 months (total 50 mSv per year) for women of reproductive age, with a maximum of 10 mSv to the foetus throughout the remainder of pregnancy after a pregnancy has been diagnosed (this diagnosis is presumed to be made within two months after conception). The intent has been to ensure that total radiation doses to the developing child would not exceed 20 mSv. More recent ICRP recommendations on this topic have remained essentially unaltered (3). The purpose of these recommendations is to minimize the possibility of radiation damage to the developing child *in utero*; the probability per unit dose of radiation-induced cancers plus genetic disorders is not greatly different for female and for male radiation workers themselves (see section 1.2).

The ICRP recommendations were interpreted in Canada to mean that the maximum permissible dose rate for female atomic radiation workers (whether pregnant or not) should be 2 mSv per two weeks. In order to ensure that this legal maximum was not exceeded, the maximum dose rate was in practice often restricted to 1 mSv per two weeks in Canada (37).

After consultation with medical and scientific advisory groups, the Canadian regulations were modified in 1985 (38) to eliminate discrimination between male and female atomic radiation workers until such time as the female worker advised her employer of pregnancy. The responsibility for advising the employer of her pregnancy rests with the pregnant worker concerned. At this point, the employer is required to ensure that the pregnant worker would be assigned to a job where the total occupational radiation dose received by the foetus during the remainder of pregnancy can not exceed 10 mSv. This regulation (38) provides for a maximum permissible dose of 30 mSv in any three month period of time or 50 mSv per year for male and female radiation workers alike, provided the female worker is not known to be pregnant. In this sense, the current Canadian regulation governing employment of women as atomic radiation workers is somewhat less restrictive than the recommendations of the ICRP (3) or those of the equivalent national committee in the USA (39). However, it is on average extremely unlikely that the ICRP recommendation to keep radiation doses to the developing child to less than 20 mSv total during pregnancy would be exceeded under current Canadian regulations.

Quantitative estimates of the risk of inducing severe mental retardation as a result of irradiation of the developing child *in utero* became available in 1969 (40). Recent re-analysis of the data has resulted in some refinement but no substantial change in these earlier estimates (41). The current data indicate close to zero risk for induction of severe mental retardation after irradiation during the first seven weeks of pregnancy (i.e. the first nine weeks after the last menses), a risk of 4 in 10 000 per mSv during 8 to 15 weeks of pregnancy, and an average risk of one in 10 000 per mSv for induction of severe mental retardation averaged over the whole of pregnancy. These risks are high compared, for example, to the risk of induction of fatal cancer (about 0.15 in 10 000 per mSv) in the female radiation worker herself. In addition, there may be a risk of about 0.2 in 10 000 per mSv for induction of fatal cancer in children exposed to radiation *in utero* (2). Other less serious health risks, e.g., loss of a fertilized egg cell before implantation and development in the womb, have also been identified (2,6). However, the potential radiation hazards during the earliest stages of pregnancy (i.e. the first nine weeks after the last menses) would appear to be sufficiently small to justify the current non-discriminatory regulations governing employment of non-pregnant female atomic radiation workers in Canada (42).

However, all radiation workers, whether men or women, should be informed of the details of the potential radiation hazards involved in their job, so that they understand these potential hazards before agreeing to continued employment as a radiation worker. These details include the hazards of exposure of the unborn child to radiation during pregnancy.

5. IMPLEMENTATION OF RADIATION PROTECTION PRINCIPLES

Radiation protection depends on attitudes as well as on formal rules and regulations. Those involved (the regulators, the employers and the employees) all carry some degree of responsibility in such matters. Conformity with rules and regulations is important. However, motivation and work habits are equally important, and affect all levels of persons involved in the protection of others and of themselves against unnecessary exposure to radiation.

5.1 Role of Atomic Energy Control Board

The Atomic Energy Control Board of Canada (AECB) plays the key role in regulation of all activities concerned with the operation of nuclear facilities or the use of radioactive materials in Canada. These activities include all aspects of uranium mining and milling, refining of radioactive ores, fabrication of fuel for nuclear reactors, operation of nuclear reactors, production of radioactive materials in nuclear reactors or in high energy accelerators, utilization of radioactive materials in nuclear medicine, in research and in industry, transportation of radioactive materials, and the management and disposal of radioactive wastes.

The primary responsibilities of AECB are to make regulations under the Canadian Atomic Energy Control Act for review and approval by the federal government, to issue to various persons or organizations licenses to operate nuclear facilities or to work with radioactive materials after careful scrutiny of the proposed activities, to assess various radiation protection practices, and to inspect the operation of licensed facilities in order to ensure that conditions of the license are being observed.

In support of these responsibilities, AECB currently spends about three million dollars per year to support research on crucial questions in radiation protection, reactor safety and safeguards, and has also established an Advisory Committee on Radiological Protection and an Advisory Committee on Nuclear Safety to provide independent scientific advice on relevant topics in radiation protection and nuclear safety.

Consultative documents are issued by AECB for public comment before legal amendments to regulations are established. Applicants for the construction of new nuclear facilities are required by the federal Department of the Environment to present relevant information at public meetings; these meetings are also monitored by AECB. Close cooperation with provincial authorities, with other federal agencies and with international agencies is essential for the fulfillment of AECB responsibilities.

5.2 Role of Department of National Health and Welfare

The Bureau of Radiation and Medical Devices of the Health Protection Branch, Department of National Health and Welfare (DNHW), is concerned with all aspects of protection against ionizing (and non-ionizing) radiation, whether from radioactive materials, X-ray machines or any other source. The Bureau acts as a principal health adviser to AECB and works closely with provincial agencies concerned with radiation protection. Its activities are directed towards two main purposes: (a) to help ensure the health and safety of Canadian radiation workers, and (b) to assess and make recommendations concerning the radiation exposure of members of the public.

The Bureau monitors levels of radioactive materials in food, drinking water and in the air at numerous places across Canada, an activity which was started in the 1950's. Background radiation levels in various cities are also monitored.

The Bureau further provides a dosimetry service for external exposures of many radiation workers in Canada; these include uranium miners and persons working with X-ray machines and other sources of ionizing radiation. Recorded exposures

above the legal maximum permissible doses are investigated. A National Dose Registry (43) has been established to maintain a permanent record of all occupational exposures in Canada; this record, in machine-readable form, is essentially complete for most current occupational exposures and contains most of the earlier records dating back to the 1950's. Statistical information from these records is provided to the AECB and other responsible agencies when required. Whole body counting and bioassay facilities are provided for monitoring internal radionuclides.

New X-ray machines and other devices are also tested by the Bureau as they come on the market to ensure that they meet specified safety standards. Owing to recent concerns about the health effects of public exposures to radon and short-lived radon daughters, a large scale survey of radon daughter levels in homes across Canada has been carried out (44). The resulting data have been crucial to an informed consideration of possible levels at which remedial action might be required (25).

The Bureau cooperates with other agencies and other divisions of the Department of National Health and Welfare in establishing federal guidelines for maximum permissible concentrations of radioactive materials in drinking water for the general public (45).

In addition, the Bureau plays a key role in the nuclear emergency response plan of the federal government. Although provincial governments have jurisdiction over and responsibility for off-site contingency planning in respect of nuclear emergencies within the province (46), the federal nuclear emergency control centre in the Bureau is responsible for liaison between various federal departments and agencies, the provinces and the U.S.A., for coordination of federal activities, and for assistance to the provinces as requested.

5.3 Role of the provinces

The provinces are responsible for regulations concerning occupational exposures to X-rays as well as exposures to certain other sources of ionizing radiation. Although this legislation has varied from time to time from one province to another, the legal requirements have, in general, conformed with the recommendations of the ICRP and of DNHW as well as with the AECB's legal restrictions.

One interesting provincial initiative was the early establishment of the principle that maximum permissible exposures of uranium miners in Saskatchewan should be limited by the sum of their exposures to radon daughters and to external gamma-radiation (47) as recommended by the ICRP (3). The province of Saskatchewan is, like other provinces, responsible for legislation concerning the health and safety of workers generally.

Provincial legislation governs rehabilitation and compensation of workers who may have suffered from any injury or disease which might be attributable to their occupation; a number of early uranium miners in Ontario and fluorospar miners in Newfoundland have received workers' compensation for cancers which may have been caused by occupational exposures to radon daughters at a time when this hazard was not fully appreciated. The province of Ontario, in collaboration with AECB, continues to study the health of Ontario miners, including uranium miners.

Many of the provinces carry out their own programs, in cooperation with DNHW, to monitor radiation levels in the environment and thus to ensure that the health of their populations is not endangered from this potential source of hazard. Planning for emergencies involving serious nuclear accidents, like that for other emergencies, is also controlled by provincial legislation.

5.4 Responsibility of the licensee

The basic responsibility of the licensee is to provide to the worker a safe working place and to provide a facility which will have minimal harmful effects on other persons in the vicinity. To achieve these objectives, the licensee must ensure that all legal requirements of the licence, whether issued by a federal or provincial authority, are observed. This is essential if the licence in question is not to be revoked or withdrawn.

Many licensees have gone beyond the minimum requirements of their legal licence and have made major additional contributions to the basic objectives of radiation protection in Canada. The results of these collective endeavours to keep all radiation exposures low are obvious from the average occupational exposures recorded in the National Dose Registry (17). Successful efforts are also being made to keep the unregulated diagnostic exposures of patients from radiography (48) or from the use of radionuclides in nuclear medicine (4) to a low level. An example of the formal programs instituted by one particular licensee to keep radiation exposures low is described in more detail elsewhere (21,49).

It is anticipated that regulations governing the use of radioactive materials in Canada (19) will, in future, require all licensees to establish and maintain programs designed to keep radiation exposures of workers and of the general public as low as reasonably achievable (see section 4.1). Workers should be provided with relevant information on the biological effects of radiation and methods for measuring radiation levels, with an emphasis on the proper methods for protecting individual workers, their fellow-workers and the general public against unwarranted exposures to radiation.

All licensees are also required to provide for monitoring of the radiation exposures of their workers. Potential and actual exposures in excess of the dose limits of any atomic radiation worker must be reported to AECB. Certain major facilities are authorized by AECB to conduct their own dosimetry service in situations where the potential for high exposures exists and there is a need for immediate assessment of the radiation doses received by their employees; all of the recorded dose measurements are supplied to the National Dose Registry operated by DNHW.

5.5 Responsibility of the worker

Protection against radiation, like protection against any other risks in the working place or to the surrounding environment, is only achievable with the full participation of the radiation worker. The objective of radiation workers should be to protect themselves, their colleagues and other people in the surrounding environment against potential harm from unnecessary radiation exposure.

To achieve these objectives, the radiation worker would require some knowledge of:

[i] basic principles of radiation protection,

[ii] conditions of the licence,

[iii] equipment for monitoring radiation levels,

[iv] the working environment and available means of protection such as respirators, gloves, ventilation, shielding materials and waste disposal requirements,

[v] emergency programs of the facility.

This knowledge can be acquired by courses and training programs provided by the licensee with the collaboration of government agencies, universities and other resources. Knowledge should be updated periodically as new techniques or other changes are introduced.

Awareness of the principles required for radiation protection should include awareness of other occupational hazards. Active collaboration with labour-management committees dealing with health and safety in all areas including that of radiation protection can function effectively to achieve this goal.

Implementation of the ALARA principle is largely the responsibility of the licensee since this is frequently a matter of improvements in the design of a facility as and when required for increased protection of the worker and of the general public (19). However, achievement of ALARA on a day-to-day basis continues to rely on the commitment of workers as well as management to the underlying concept and to its application through proper operational procedures and training (50). In this regard, an essential requirement is a sincere will on the part of the worker to acquire the necessary knowledge to protect his or her own health and that of others and to use the proper means of protection at the proper time. Forethought and attention to safe working procedures is essential.

6. REFERENCES

(1) BEIR III Report. The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. National Academy of Sciences, Washington (1980).

(2) UNSCEAR 1982 Report. Ionizing radiation: sources and biological effects. United Nations, New York (1982).

UNSCEAR 1977 Report. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, New York (1977).

(3) ICRP Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, vol. 1, no. 3 (1977).

(4) Lentle, B.C. and Scrimger, J.W. Radiation doses from diagnostic medical procedures. Report to the Advisory Committee on Radiological Protection, Atomic Energy Control Board, Ottawa (1985).

(5) ICRP Publication 45. Quantitative bases for developing a unified index of harm. Annals of the ICRP, vol. 15, no. 3 (1985).

(6) UNSCEAR 1986 Report. Genetic and somatic effects of ionizing radiation. United Nations, New York (1986).

(7) Timofeeff-Ressovsky, N.W. Zu Frage der Bezeihungen zwischen strahlenausgelösten Punkt- und Chromosomenmutationen bei Drosophila. Chromosoma, vol. 1, p.310-316 (1939).

Spencer, W.P. and Stern, C. Experiments to test the validity of the linear R-dose/mutation frequency relation in Drosophila at low doses. Genetics, vol. 33, p.43-74 (1948).

Markovitch, H. The problem of the biological action of low doses of ionizing radiation. Proc. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy II, p.244-247 (1956).

Nauman, C.H., Underbrink, A.G. and Sparrow, A.H. Influence of radiation dose rate on somatic mutation induction in Tradescantia stamen hairs. Radiat. Res., vol.62, p.79-96 (1975).

Unrau, P., Zimmermann, F.K. and Johnson, L.D. Linear dose response of gene conversion in Saccharomyces cerevisiae after ionizing radiation. Radiat. Res. vol.85, p.349-354 (1981).

(8) Russell, W.L., Russell, L.O.B. and Kelly, E.M. Radiation dose rate and mutation frequency. Science, vol.128, p154-155 (1958).

Russell, W.L. and Kelly, E.M. Mutation frequencies in male mice and the estimation of genetic hazards of radiation in men. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, vol.79, p.542-544 (1982).

(9) Schull, W.J., et al. A reappraisal of the genetic effects of the atomic bombs: summary of a thirty-four year study. Science, vol.213, p.1220 (1981).

(10) Ad Hoc Working Group to Develop Radioepidemiological Tables. Report to the National Institutes of Health. NIH Publication No. 85-2748. U.S. Department of Health and Human Services, Washington (1985).

Carcinogenesis - A Comprehensive Survey Vol. 10. The role of chemicals and radiation in the etiology of cancer. (eds. E. Huberman and S.H. Barr). Raven Press, New York (1985).

(11) Pochin, E.E. Malignancies following low radiation exposures in man. Brit. J. Radiol., vol.49, p.577-579 (1976).

(12) ICRP Publication 32. Limits for inhalation of radon daughters by workers. Annals of the ICRP, vol.6, no.1 (1981).

(13) Myers, D.K. and Werner, M.M.. A review of the health effects of energy production. Nucl. J. Canada, vol. 1, p.14-24 (1987).

Myers, D.K., et al. Comparison of the health benefits and health risks of energy development, p.289 in Risks and Benefits of Energy Systems. International Atomic Energy Agency, Vienna (1984).

Hamilton, L.D. Health and environmental risks of energy systems. p.21 in Risks and Benefits of Energy Systems. International Atomic Energy Agency, Vienna (1984).

Siddall, E. Safety policy in the production of energy. Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-7540 (1982).

Sagan, L.A. and Afifi, A.A. Health and economic factors affecting mortality. p.139 in Energy Risk Management (ed. G.T. Goodman and W.D. Rowe), Academic Press, New York (1980).

Cohen, B.L. and Lee, I-S. A catalog of risks. Health Physics 36, p.707 (1979).

(14) ICRP Publication 37. Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. Annals of the ICRP, vol.10, no. 2/3 (1983).

(15) ICRP Statement from the Paris meeting. Annals of the ICRP, vol.15, no.3 (1985).

(16) Occupational Safety and Health Branch. Work injury experience and cost in Canada 1971-1980. Labour Canada, Ottawa (1982).

(17) Sont, W.N. and Ashmore, J.P. Projected whole body career doses for radiation workers in Canada. Health Physics 47, p.693 (1984).

(18) Report of the Royal Commission on the Health and Safety of Workers in Mines; J.M. Ham, Commissioner. Government of Ontario, Toronto (1976).

(19) Consultative Document C-83. Proposed general amendments to the Atomic Energy Control Regulations. Atomic Energy Control Board, Ottawa (1983).

(20) Application of the ALARA Process. A report by the Advisory Committee on Radiological Protection and Advisory Committee on Nuclear Safety, AECB, Ottawa. In preparation.

(21) Wilson, R., et al. The application of ALARA in Ontario Hydro. Paper presented at Health Physics Society Annual Meeting, Chicago, 1985. Report HSD-IR-85-6, Ontario Hydro, Toronto (1985).

LeSurf, J.E., et al. Occupational radiation exposures at Canadian CANDU nuclear power stations. Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-7769 (1982).

(22) Beninson, D. and Lindell, B. Bases and trends in radiation protection philosophy. Seminar on Interface Questions in Nuclear Health and Safety, Paris, OECD Nuclear Energy Agency (1985).

Lindell, B. Concepts of collective dose in radiological protection, OECD Nuclear Energy Agency, Paris (1984).

(23) Editorial. More on ALARA. Radiological Protection Bulletin No. 70, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1986).

(24) IAEA Safety Series No. 67. Assigning a value to transboundary radiation exposure. International Atomic Energy Agency, Vienna (1985).

(25) Létourneau, E.G. Radon standard for Canada. Indoor Air Quality in Cold Climates: Hazards and Abatement Measures, Ottawa, April 1985.

Létourneau, E.G. Limitation of exposure to natural radioactivity in Canada. Seminar on Exposure to Enhanced Natural Radiation and Its Regulatory Implications, Maastricht, March 1985.

(26) Consultative Document C-104. Proposed regulatory policy statement: Regulatory objectives, requirements and guidelines for the disposal of radioactive wastes. Atomic Energy Control Board, Ottawa (1986).

(27) Consultative Document C-85. The basis for exempting the disposal of certain radioactive materials from licensing. Atomic Energy Control Board, Ottawa (1985).

Recommended *De Minimis* Radiation Dose Rates for Canada (AC-1). A report by the Advisory Committee on Radiological Protection and Advisory Committee on Nuclear Safety, AECB, Ottawa. In publication.

(28) ICRP Publication 46. Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive wastes. Annals of the ICRP, vol.15, no.4 (1985).

(29) Revision to scheduled quantities of radioactive prescribed substances. Atomic Energy Control Board, Ottawa (1985).

(30) Bromley, J. Comparing the hazards of coal and uranium mining. Atom 365, p.3-9 (1987).

(31) ICRP Publication 2. Recommendations of the ICRP and Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation. Pergamon Press (1959).

(32) Mitchell, J.S. Memorandum on some aspects of the biological action of radiations, with especial reference to tolerance problems. Document I-17, National Research Council, Atomic Energy Project, Montreal (1945).

(33) ICRP Publication 30. Limits for intakes of radionuclides by workers. Annals of the ICRP, vol.2, no.3/4 (1979) to vol.8, nos.1-4 (1982).

IAEA Safety Series No.26. Radiation protection of workers in the mining and milling of radioactive ores. International Atomic Energy Agency, Vienna (1983).

ICRP Publication 47. Radiation protection of workers in mines. Annals of the ICRP, vol.16, no.1 (1986).

(34) Ching, S.H., et al. Gamma doses and radon daughters exposures in some Canadian uranium mines and implications with respect to the proposed regulatory amendments. p.567 in Occupational Radiation Safety in Mining (ed. H. Stocker), Canadian Nuclear Association, Toronto (1985).

(35) ACRP-1. Risk estimates for exposure to alpha emitters. Advisory Committee on Radiological Protection, AECB, Ottawa (1982).

(36) ICRP Publication 50. Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. Annals of the ICRP, vol. 17, no. 1 (1987).

(37) Létourneau, E.G., et al. The female atomic radiation worker. Paper presented at the Canadian Radiation Protection Association Annual Meeting, Toronto (1983).

(38) Atomic Energy Control Regulations, amendment. Registration SOR/85-335. Canada Gazette Part II, vol.119, no.9, p.1884 (April 1985).

(39) NCRP Report No. 53. Review of NCRP radiation dose limit for embryo and foetus in occupationally-exposed women. National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington (1977).

(40) Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. A/7613. General assembly official records 24th session, suppl.no.13. United Nations, New York (1969).

(41) Otake, M. and Schull, W.J. In utero exposure to A-bomb radiation and mental retardation; a reassessment. Brit. J. Radiol. 57, p.409 (1984).

(42) ACRP-6. Harm to offspring of women of childbearing age employed in the nuclear industry. Advisory Committee on Radiological Protection, AECB, Ottawa (1984).

(43) The National Dose Registry of Canada. Document 83-EHD-89, Health and Welfare Canada, Ottawa (1982).

(44) McGregor, R.G., et al. Background concentrations of radon and radon daughters in Canadian homes. Health Physics, 39, p.285 (1980).

Létourneau, E.G., et al. Lung cancer mortality and indoor radon daughter concentrations in 18 Canadian cities. p.470 in 16th Midyear Topical Meeting, Epidemiology Applied to Health Physics, Albuquerque (1983).

(45) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality. Department of National Health and Welfare Ottawa (1978).

(46) Federal Nuclear Emergency Response Plan. Department of National Health and Welfare, Ottawa (1984).

(47) Alderman, J.R. Occupational health and safety of workers in Saskatchewan uranium mines. p.608 in Radiation Hazards in Mining (M. Gomez, ed.), Society of Mining Engineers, New York (1981).

(48) Taylor, K.W., et al. Variations in X-ray exposures to patients. J. Can. Assoc. Radiologists, 30, p.6 (1979).

(49) Wilson, R., et al. Occupational dose reduction experience in nuclear power stations. Report HSD-IR-85-1, Ontario Hydro, Toronto (1985).

(50) Webb, G.A.M. Board advice on cost-benefit analysis. Radiological Protection Bulletin No. 72, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1986).

GLOSSARY

ACRP: Advisory Committee on Radiological Protection, Atomic Energy Control Board of Canada.

AECB: Atomic Energy Control Board of Canada.

ALARA: All exposures shall be kept As Low As Reasonably Achievable, economic and social factors being taken into account.

Alpha particle: A positively-charged particle emitted during the decay of certain unstable atomic nuclei, and having the charge and mass of the nucleus of a helium atom.

Atomic number: A number characteristic of each element and equal to the number of protons in the atomic nucleus of that element.

Atomic radiation worker: Any person who in the course of work associated with radioactive substances or a nuclear facility could receive a dose of ionizing radiation in excess of 5 mSv in a year. The term "radiation worker" is used in a broader sense to include persons who work with X-ray machines and accelerators.

Becquerel (Bq): A unit of activity equal to one radioactive disintegration per second. Until the 1970's, the unit of activity was the curie, where 27 picocuries equals one becquerel.

BEIR: An advisory committee on Biological Effects of Ionizing Radiation which is funded by the U.S. Environmental Protection Agency and reports to the U.S. National Academy of Science.

Benefit: In general, anything that is considered desirable, for example, food, health, housing, jobs, prosperity, consumer products, medical services, transportation, a desirable lifestyle, etc. The term health benefits is restricted to maintenance of and improvements in general health and longevity.

Beta ray (or particle): A charged particle emitted during the decay of certain unstable atomic nuclei, and having the charge (+1 or -1) and mass of an electron.

Cancer: A malignant tumor of potentially unlimited growth, capable of invading surrounding tissue or spreading to other parts of the body by metastasis. Some cancers are fatal while others in certain tissues such as skin and thyroid can usually be cured by medical intervention.

Committed dose: The total dose received from a radioactive substance in the body during 50 years following the intake of this substance.

Collective dose: The sum of the individual radiation doses received by a group of persons, expressed in person-sieverts.

DNA (deoxyribonucleic acid): Genetic material, found in all living organisms, which carries the inherited instructions for life processes.

Dose: The amount of radiation energy deposited per unit mass of tissue, usually expressed in joules per kilogram. For simplicity, the term dose has been used in the present document (unless otherwise stated) to refer to the quantities of general interest in radiation protection, namely dose equivalent and effective dose equivalent (see definitions).

Dose commitment: The sum of all doses received following the release or intake of a given amount of a radioactive material. Collective dose commitments are summed over long periods of time extending, in theory at least, to infinity.

Dose equivalent: A quantity that expresses all radiation doses on a common biological scale. For example, the alpha particles emitted during the decay of certain radioactive materials have considerably more biological effect than do X-rays per unit of energy deposited in a tissue. For this reason, doses expressed in terms of absorbed energy per kilogram of tissue are multiplied by an internationally-accepted quality factor (Q) which reflects the relative biological effectiveness of different types of radiation; the result is designated dose equivalent. The standard international unit for the dose equivalent is the sievert (see definition); some convenient multiple such as the millisievert (see definition) is frequently used in the present document.

Dose rate: The quantity of dose per unit time.

Effective dose equivalent: The sum of the dose equivalents received by different tissues of the human body, each multiplied by the internationally-recommended values of the weighting factors assigned to each respective tissue. The weighting factor reflects the probability that a unit dose of radiation to the tissue in question will result in a fatal cancer in the exposed person or a serious genetic disorder in the children or grandchildren of the exposed person. The sum of the weighting factors for all tissues of the body is 1.0; the effective dose equivalent is expressed in the same units (that is to say, the sievert) as dose equivalent.

Fetus: The unborn developing human child in the womb from the end of the second month of pregnancy until birth. The term embryo is used to describe the developing child during the first two months of pregnancy.

Gamma ray: A short wavelength electromagnetic radiation of nuclear origin which is emitted during the decay of certain unstable atomic nuclei.

Genetic disorder or disease: An inherited disease; alternatively, a serious individual deviation from the average characteristics of human populations, which requires medical attention at some time in the

person's life and which is genetic or partially-genetic in origin. Over a thousand types of heritable disorders ranging from albinism to Down syndrome ("mongolism") to hereditary deafness in old age have been listed.

Half-life: The time required for a radioactive isotope to lose half of its initial activity by decay. This time is different for, and characteristic of, each radionuclide.

Harm: In general, anything that is considered undesirable or that detracts from people's ability to obtain items that are considered to be of benefit. This general category includes any detrimental effects on health and on longevity.

IAEA: International Atomic Energy Agency.

ICRP: International Commission on Radiological Protection.

In utero: In the womb.

Ionizing radiation: Radiation which is sufficiently energetic to dislodge electrons from an atom and thus to produce ions in an otherwise non-ionized gaseous medium. Ionizing radiations include X- and gamma-rays, beta-rays, alpha particles and other atomic nuclei moving at high speed. Neutrons also produce ionizing radiations by interaction with matter. Ionizing radiations can also produce free radicals in living tissues, which result in potentially harmful chemical changes in tissue constituents.

Licensee: A person or organization licensed by the Atomic Energy Control Board or by provincial authorities to possess and work with sources of ionizing radiation.

Medical practice: The art and science of restoring and preserving health.

Microsievert: One millionth part of a sievert.

Millisievert (mSv): One thousandth part of a sievert.

NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements, USA.

Neutron: An uncharged subatomic particle capable of producing ionizing radiations as an indirect consequence of its collisions with atomic nuclei.

Non-stochastic: A term applied to those biological effects of ionizing radiation which do not appear until the radiation dose exceeds a threshold dose. This threshold dose varies markedly depending upon dose rate and biological endpoint.

Occupational accidents: Fatal or non-fatal injuries to workers which occur at work. Occupational accidents currently account for about 6 percent of all deaths due to violent causes in Canada.

Radiation: See ionizing radiation.

Radioactive: Materials capable of producing ionizing radiations as a result of the spontaneous decay or disintegration of unstable atomic nuclei in that material.

Radioisotope or radionuclide: A particular form of an element, characterized by a specific atomic mass and atomic number, whose atomic nucleus is unstable and decays or disintegrates with a statistical probability characterized by its physical half-life.

Radon daughters: A series of short-lived radionuclides produced by the decay of radon-220 and radon-222. The short-lived radioactive progeny produced by decay of radon-220 are also referred to as thoron daughters.

Risk estimate: An estimate of the statistical probability per unit dose of producing a stochastic biological effect as a result of exposure to ionizing radiation at low doses or low dose rates. (Other interpretations of the term risk are not used in the present document).

Safe industry: An industry in which the probability of occupational fatalities does not exceed one per 10 000 workers per year. About 80% of all workers in Canada are currently employed in safe industries.

Sievert (Sv): The unit of dose equivalent or effective dose equivalent (see respective definitions). The dose equivalent in sieverts equals the absorbed dose in joules per kilogram (J/kg) multiplied by the appropriate quality factor, which is conventionally taken to be one for X-, beta- or gamma-rays and to be twenty for alpha particles. Prior to 1977, dose equivalents were expressed in rem, where 100 rem equals one sievert.

Stochastic: A term applied to those biological effects of ionizing radiation whose probability of occurrence is assumed to increase in direct proportion to any increase in radiation dose at low doses or low dose rates. The biological effects in question are radiation-induced cancers and genetic disorders; for reasons of prudence, severe mental retardation caused by irradiation of the foetus may be included in the same category. Stochastic processes incorporate an element of randomness or a hit-or-miss quality; the number of random hits will on average increase in direct proportion to the number of random projectiles to which the target is exposed.

Threshold dose: The minimum dose below which there is no given biological response or effect.

UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

WHO: World Health Organization.

WLM: Working Level Month, originally defined as the exposure received while working for 170 hours in an atmosphere containing 100 picocuries (3.7 becquerel) of radon-222 per litre in equilibrium with its short-lived daughters. If the average breathing rate is taken to be 1.2 m^3 (1200 litres) per hour, one WLM is equivalent to inhalation of short-lived radon daughters with a total potential alpha particle energy of 4.2 millijoules. Potential alpha energy is the sum of alpha energies from all of the short-lived daughters in the decay series. In the decay series from radon-222, alpha particles of similar energies are emitted sequentially by polonium-218 and polonium-214; thus the potential alpha energy per atom of polonium-218 deposited in the respiratory tract is about twice that of polonium-214.

X-ray: A short wavelength electromagnetic radiation emitted during certain rearrangements of the electron shells of an atom. X-rays may be produced during radioactive decay or from the slowing down of fast electrons in any material. They are usually obtained from X-ray machines in which a metallic target is bombarded with fast electrons in a high vacuum.

APPENDIX A
HISTORY OF RADIATION PROTECTION IN CANADA

The history of radiation protection dates from the late 1890's. Although Canadian specialists were aware of earlier international developments, specific Canadian recommendations on radiation protection date from about 1945. For convenience, the following history is arbitrarily divided into ten-year periods.

1896-1905: Discovery

Events occurred very quickly at the start of the decade, following the discovery of X-rays by Roentgen in 1895 (1) and of natural radioactivity by Becquerel in 1896 (2). By 1896, pioneers in the UK had used X-rays to locate a needle buried in a hand. Epilation of the scalp with X-rays had been reported and 23 cases of radiation dermatitis had been noted by 1897 (3). X-rays were used to cure a skin cancer in 1899 (4) but shortly after that, in 1902, cancer of the skin of the hand was reported to have followed typical X-ray dermatitis in an employee in a roentgen-tube factory (5). In 1901, a "radium burn" was observed on the skin by Becquerel (6). Effects of X-rays on the bone marrow, growth, fertility and survival of laboratory animals had been reported by the end of this first decade. Such deleterious effects were cause for concern and already by 1898, in Britain, the council of the Roentgen Society had resolved to collect information on the injurious effects of roentgen rays.

An initial step in radiation protection was taken by Rollins who suggested that if a photographic plate was not fogged by X-rays in seven minutes, then the radiation was not of harmful intensity. Rollins also was to state "it is essential to prevent the escape of every ray not needed to make a photograph or to illuminate the screen" (7). This was perhaps the first statement of what we would think of now as keeping exposures as low as reasonably achievable.

Therefore within that first decade it had been established that X-radiation was useful in medical diagnosis and in the treatment of disease; the hazards of skin damage, of bone marrow damage and malignancy had been noted and there had been a first attempt to minimize exposures.

1906-1915: Protective Devices

The realization that protection was needed characterizes this period. Protective devices (aprons, gloves) started to be widely used to protect the radiologists. By the end of the period the (British) Roentgen Society was recommending that "personal safety of the operators conducting the Roentgen ray examination should be secured by the universal adoption of stringent rules."

1916- 1925: Creation of Committees

At the end of the First World War, protection was very much an ad hoc affair but concern was sufficient to lead to the formation of, in the US, the Roentgen Ray Protection Committee and in Britain, the X-ray and Radium Protection Committee. The latter made two pragmatic recommendations: a) simply, the amount of lead that was needed to shield operators and b) the need "to establish a maximum tolerance dose in terms of a specifiable and reproducible biological standard and, if possible, expressing this biological standard in physical units." At

that time, there was not sufficient information to be able to express the maximum tolerance dose in physical units. The best that could be done by 1925 was Mutscheller's suggestion that one hundredth of an erythema dose every 30 days could be tolerated (8). (The erythema dose, i.e. the minimum dose required to cause reddening of the skin, is now known to vary from about 300 roentgens from soft unfiltered X-rays to about 1000 roentgens from high energy gamma-rays; a mean value of 600 roentgens was officially adopted in the US in 1931.) Considerable attention was devoted to the erythema dose as a specifiable biological standard during the next 10 years but by the next decade attention was concentrated on physical measurements. The First International Congress of Radiology, held in 1924 under the auspices of the International Society of Radiology, had meanwhile established the International X-Ray Committee to consider methods of measuring radiation exposures in physical units (9).

1926-1935: Quantification of Exposure

At the start of this period, the tools needed for physical quantification of exposures became available. Fricke and Glasser had developed an air equivalent ionization chamber (10). It was then possible to measure exposures accurately in terms of the amount of ionization they produced. The recently formed International X-Ray Unit Committee, which was later to become the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU), had agreed on a definition of the roentgen as the unit of X-ray exposure and brought order to the confusion that arose from the plethora of suggested units. (The roentgen was defined in 1928 as "the quantity of X-radiation which, when the secondary electrons are fully utilized and the wall effect of the chamber is avoided, produces in 1 cm^3 of atmospheric air at 0°C and 76 cm of mercury pressure such a degree of conductivity that 1 electrostatic unit of charge is measured at saturation current".) The way was then clear for the tolerance erythema exposure to be described in physical terms.

Two new committees began to play the major role in protection. In 1928 the Second International Congress of Radiology had formed the International X-ray and Radium Protection Committee; this Committee was later to become the International Commission on Radiological Protection (ICRP) (9). Coincident with this, in the US the Advisory Committee on X-rays and Radium Protection had been formed; this committee was later to become the US National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) (9).

The first reports of both Committees provided no quantitative guidance on tolerance exposures. They both were concerned with shielding and working conditions. A feature, now abandoned, of the recommended working conditions were long vacations for radiation workers. The need to protect the patient is noted for the first time in the US report.

By 1934, both committees had come to grips with the quantification of the tolerance exposure with slightly different results. The International Committee recommended 0.2 roentgen per day for X-rays (11), later modified to 1 roentgen per week (ie. about 50 roentgen per year). The US Committee had recommended 0.1 roentgen per day, primarily for use with exposure to gamma-rays from radium though they did, two years later, adopt the same value for X-rays (12). The lower value they adopted probably reflected their emphasis on results obtained with the radium exposures whereas the International Committee was still con-

cerned mainly with X-rays. Uncertainty as to the biological mechanisms involved in producing observable effects, for example reduction in the blood cell count, made the International Committee reluctant to recommend a value for radium gamma-rays.

The concept of the tolerance exposure as expounded by these committees was generally accepted though reservations were expressed. For example, Muller interpreted his results (13) to indicate a linear non-threshold relationship between radiation exposure and induced genetic effects in the fruit fly *Drosophila*. Others were also worrying about the concept of a threshold. Nevertheless by the end of this period in 1935, there was a usable physical unit of exposure, a method of measuring that quantity, and a generally accepted tolerance exposure limit.

1936-1945: Advent of the Nuclear Age and the Professional Health Physicist

The International Committee in 1937 had extended the list of tissues and organs that it regarded as critical to include the skin and other superficial tissues, the blood-forming organs and gonads (14), but there was still no internationally recommended tolerance dose of gamma radiation. The war effort, and in particular the Manhattan Project, operated using a tolerance dose of 0.1 roentgen per day although a weekly limit of 0.5 roentgen was also imposed. A notable occurrence in this project was the creation of a new kind of professional. Some physicists and some chemists were directed in the project to concern themselves with the implications to health of the new radiation sources with which they were dealing. They became health physicists and health chemists; the former is the name that has survived though health physicists now come from many basic disciplines.

The US Manhattan Project had operated under conditions of strict security and secrecy. Most people only became aware of the advent of the nuclear age when two atomic bombs were exploded over Hiroshima and Nagasaki in August 1945. This was followed quickly by the end of the Second World War.

The Canadian Atomic Energy Project was established in 1942 and operated at the Montreal laboratories and later at Chalk River, Ontario, under the auspices of the National Research Council. Radiation protection was included from the beginning as a major concern. A 1945 document by J.S. Mitchell (15) reviews biological effects of radiation and presents recommendations for radiation protection within the Canadian Atomic Energy Project. Some citations are useful to indicate the advanced level of expertise in radiation protection available in Canada at that time:

> "At present [1945] sufficient information is probably available to provide a reliable foundation for the protection of the health of workers with ionizing radiations and most radioactive substances as far as short term effects are concerned. However, knowledge of the possible long-term hazards are seriously deficient..... Before it is possible to examine any biological effect quantitatively, it is essential to be able to measure the agent producing it within reasonable accuracy..... The first step in determining the tissue dose is to measure the dose in air; for this purpose the r-unit [roentgen] was introduced and is the only satisfactory method available."

The most important diseases to be envisaged in planning measures for the protection of personnel were listed by Mitchel in a summary which would still appear accurate forty years later. With respect to induction of malignancies including leukemia by repeated small doses of radiation, it is noted that

> "The malignant or leukemic changes probably start, at least in some cases, from a single cell which has been irreversibly transformed..... Leukemia must now be regarded as one of the occupational diseases with radiations and radioactive substances. Although this was suspected as early as 1911 (Jagie et al), convincing aetiological evidence, supported by animal experiments, has been presented only during the last few years..... The implication of these findings is that one factor in the production of leukemias by radiation is an irreversible process proportional to the total dose with negligible recovery -- perhaps a somatic mutation. This matter is obviously of such importance that much further work is urgently required."

Considerable emphasis was also placed on the genetic hazards of radiation (15), as illustrated by the following quotation.

> "The radiation appears to increase the rate of spontaneous mutation and it is generally accepted that no new types of gene mutation are produced by irradiation. The production of gene mutations by ionizing radiations is: (i) An irreversible process, (ii) Linearly proportional to the tissue dose, ie. total number of ion pairs per unit volume, (iii) Independent of the time distribution of the dose (fractionation or dilution over an intensity range varying by a factor of 500), (iv) Independent of the energy of the X- and gamma-radiation from 0.005-0.8 MeV, (v) Found to occur at all stages of maturity of the germ cells. Most of the work on gene mutations has been carried out in the fruit fly *Drosophila*..... Most of the inherited characters resulting from gene mutations are Mendelian recessives and are undesirable..... The value at present accepted for the tolerance dose rate for total body exposure to the gamma radiation from radium is 0.1 r [roentgen] per day (National Bureau of Standards Handbook H-23, Washington, 1938)..... In establishing this tolerance dose, which is considered much more satisfactory than any previously suggested value, genetic effects and inherited damage of all types were deliberately ignored..... The extensive experimental work on the production of gene mutations in *Drosophila* by ionizing radiations raises important questions to which answers are not at present available..... Until definite answers are forthcoming, anxiety must be felt over these problems but they must be seen in perspective..... Accordingly it is proposed that, while the value of 0.1 r per day recommended by the National Bureau of Standards is retained as the official tolerance dose rate for total body gamma irradiation, every effort should be made within the Canadian and United Kingdom Project, to ensure that a value of 0.05 r per day is never exceeded."

Within the Canadian Atomic Energy Project, recommended maximum radiation doses were thus reduced to about 15 roentgen per year in advance of ICRP recommendations to this effect. These early considerations of a linear, non-threshold dose-response relationship for induced genetic changes and the possibility of a similar relationship for radiation-induced leukemias were not completely incorporated into ICRP recommendations until 1959.

The relative biological effectiveness (RBE) was also taken into account in calculation of the tolerance fluxes of neutrons (15). Suggested RBE values were approximately 10 for 1 MeV neutrons, decreasing with increasing energy to approximately 3-4 for 20 MeV neutrons. Similar values were later adopted by the ICRP. One of the most serious hazards envisaged within the Canadian Atomic Energy Project in 1945 was the possibility of inducing lung carcinomas as a result of the inhalation of alpha-emitting radioactive dusts and gases (15). An RBE value of 10 was suggested for calculation of "equivalent roentgen" doses from alpha particles, based on experimental studies with bean roots. Similar values were later adopted by ICRP. The biological effects of different types of radiation were to be regarded as additive (15).

The possibility of feotal injury, notably defective development of the central nervous system, was also considered (15). It was recommended in 1945 that women should not be employed in the Canadian Atomic Energy Project in areas where there was "any serious possibility of irradiation hazard."

One of the recommendations for the Canadian Atomic Energy Project was unfortunately not implemented for some 20 years. After considering documented experience in uranium mines in the Joachimsthal-Schneeberg area and correctly identifying for the first time radon daughters as the major source of radiation dose to the bronchial epithelium, Mitchell recommended that the radon content of the air should "not exceed 5 x 10^{-1} curies per litre at any place at any time" (15). Assuming about 50-100% equilibrium with radon daughters at that time, this recommendation would have been equivalent to a maximum permissible exposure of 3-6 WLM per year in uranium mines. Appreciable numbers of uranium miners are now known to have died from lung cancer because a comparable recommendation was not actually applied to uranium mines across Canada until the 1970's.

1946-1955: Expansion of Radiation Protection

This was a time that saw the huge opening up of atomic energy, culminating in 1955 with the Atoms for Peace conference held by the United Nations. The International Atomic Energy Agency was formed to assist in development of the peaceful uses of radioactive materials. High energy X-ray machines and accelerators were also becoming available in research laboratories.

The Canadian regulatory story starts at the beginning of this period. In 1946 the Atomic Energy Control Act created the Atomic Energy Control Board (AECB) and made provision for legislation in the field of atomic energy. The first Canadian regulations appeared in 1947 but these were preoccupied with security of information and materials. Since health and safety matters were traditionally the concern and responsibility of the Provinces, there was little reference to radiation protection. "Reasonable and proper precautions" were prescribed for radiation protection. The AECB urged provincial authorities, through the Dominion Council of Health, to issue radiological safety regulations. The revision to the regulations at the end of this period in 1954 had no changes with respect to health and safety matters.

Meanwhile, work on radiation protection continued within the Canadian Atomic Energy Project as well as in the UK and USA. A 1947 report by G.C. Butler from Chalk River (16) reiterated the principles that it should be assumed the initiating damage for tumor production by ionizing radiations "is one from which

there is no recovery" and further that "there is no threshold dose for the mutational effects [of radiation] and the frequency of mutations in individual genes is proportion to the total accumulated dose." "Maximum permissible exposures for workers in the field of atomic energy" were calculated for a variety of radionuclides including uranium, plutonium, and fission products including strontium-89 and 90, iodine-131 and radioactive isotopes of krypton and xenon (16). These calculated limits were based on accepted tolerance doses, eg. 0.05 roentgen per day [about 15 roentgen per year] of gamma-rays or beta-particles (15), or a maximum permissible body burden (mpbb) of 0.1 µg (0.1 µCi) radium. The latter value was derived from an epidemiological follow-up of about 2000 dial painters and other persons in the USA who ingested appreciable quantities of radium-226; no excess of fatal bone cancers was observed in persons with less than 1 µg of radium fixed in the body. Applying a safety factor of ten, a mpbb of 0.1 µg or 0.1 µCi of radium-226 fixed in the skeleton was recommended by the US National Bureau of Standards in 1941 (17) and was confirmed by the ICRP in 1950 (18). In the absence of further data, this value was to serve for many years as the basis for calculating maximum permissible intakes for many other "bone-seeking" radionuclides. Current ICRP recommendations, though calculated on a different basis, result in similar maximum recommended quantities of fixed radium in the bone.

TRIPARTITE CONFERENCE. An event which was to have a significant influence on the development of regulations took place in Canada in the middle of this period. In 1949 a tripartite conference was held at Chalk River with 23 participants from the US, the UK and Canada. The notes and the minutes provide an explosion of concepts, of ideas, of questions, and of resolutions to problems that set the scene for decades to come in international and national recommendations and regulations. There were eight Canadian participants, including G.C. Laurence, who was to become a member of ICRU in 1950 and later to become President of the AECB. J.S. Mitchell participated as one of the UK representatives.

Some of the topics discussed and conclusions drawn will be noted. Parameters for the average or "standard" man were defined for the first time, largely based on data assembled by A.J. Cipriani from Chalk River. Standard man had a mass of 70 kg and was given the basic chemical composition, organ masses and metabolic parameters similar to those used today. The first lung model was agreed. Following considerable discussion, it was concluded that the carcinogenic effects from "hot particles" would likely be less when small masses of tissue were irradiated than if the radiation was spread over a larger mass. This was a discussion and conclusion that was to reappear some decades later.

The concept of relative biological effectiveness (RBE) was presented. Values were agreed. It is noteworthy that there was an argument as to whether one should use 200 kV X-rays or radium gamma-rays as the reference radiation. The conference agreed that radium gamma-rays would be more appropriate, arguing that, although X-rays were more often used for comparison in experiments, radium gammas would provide a better defined reference. This is one recommendation that wasn't to be followed and the ICRP later selected 200 kVp X-rays as reference radiation.

It was agreed that the blood forming organs should be the critical tissue and the permitted exposure was set at 0.3 rep per week to bone marrow. That unit, roentgen equivalent physical or rep, was defined as the dose of ionizing radiation which produces an energy absorption of 84 (later changed to 93) ergs per cubic cm of tissue. The exposure limit of 0.3 rep per week is approximately equal to 0.3 roentgen per week from gamma-rays measured in free air, which was the US practice, or about 0.5 roentgen per week at the surface of the body, which was the UK practice. The difference in these values is largely due to the increase in dose resulting from back scatter when radiation doses are measured at the body surface. The question of whether there should be a limit to the lifetime dose was raised, and is still being debated. Exposures permitted to hands was considered separately. A value of 1.5 rep per week was to be permitted; this is essentially the value adopted later in Canadian regulations. [Note: The rep as a unit of absorbed dose was soon replaced by the rad which was equal to energy absorption of 100 ergs per g of tissue. The rad was commonly used for more than 20 years until it was recently replaced by the SI unit gray, where 1 gray equals 100 rad.]

The metabolism and dosimetry of some of the internal emitters was also worked out at the 1949 conference. For bone seekers the conference deduced the minimum damaging amounts and agreed to use a factor of 10 reduction to derive the maximum permissible amounts. We note here that W.B. Lewis from Chalk River argued that if the relation between damage and dose were linear, 10 times was not a very big safety factor; others felt that this was entirely consistent with normal chemical practice.

The conference tackled the question as to what limits should be used for internally-deposited radioactive materials in the general population. They decided on a factor of a hundred below the values for workers. This was not done without some misgivings since this represented an averaged value in the general population and not that in a critical group, which is what many health physicists think of nowadays in this context. A. Brues for example, noted "the magnitude of the safety factor required for the general population depended on the avoidance of a statistically significant increase of pathological effects." He suggested that the factor should be 10 times reduction for a hundred thousand population, and a factor of a hundred for a million people. This reasoning led later to considerations of a collective dose limit.

The conference worked its way through 18 of the most important nuclides, assigning maximum permissible body burdens and permissible concentrations in air and water for each nuclide. The recommendations were distributed in Canada by National Health and Welfare, but their major impact was through the use of this material by the ICRP and the NCRP, as they were called by this time.

INTERNATIONAL COMMITTEES. In 1950, the ICRP and the ICRU were reactivated by Mayneord from the UK and by Taylor from the US. The memberships were almost completely changed from the pre-war committees, which had been largely inactive since 1937. Only L.S. Taylor (US) and R.M. Sievert (Sweden) remained from the pre-war version of the ICRP, for example. These reconstituted committees were initially dominated by people from countries that had wartime experience in nuclear energy, but by 1953 the Main Commission of the ICRP together with its subcommittees included scientific experts from a total of 10 countries. [Experts from the USSR and other eastern European countries joined the ICRP in

1959. In recent years, experts have come from Argentina, Canada, China, France, W. Germany, Japan, Poland, Sweden, USA, USSR, UK and many other countries.] Although the ICRP remained a non-governmental organization responsible only to the International Society of Radiology, its mandate was greatly expanded to include protection not only against X-rays and radium, but all other sources of ionizing radiation.

The initial report of the new ICRP in 1950 (18) recommended a maximum permissible exposure of 0.5 roentgen per week at the surface of the body or its equivalent of 0.3 roentgen per week measured in free air, as suggested by the 1949 Chalk River conference. These exposures were estimated to "correspond roughly to 0.3 roentgen per week [about 15 roentgen per year] at the critical tissue, namely the blood forming organs." For calculation of exposures in equivalent roentgens, RBE values of one were suggested for gamma-rays, X-rays and beta-rays, 10 for protons and fast neutrons, and 20 for alpha-rays. [The value of 10 for fast neutrons of about 0.5 MeV energy was to remain effective until 1984 when it was recommended that this value be increased to 20. The value of 20 for alpha particles was reduced back to 10 in 1954 (19) and increased again to 20 in 1973.] Note that the recommendations now referred to maximum permissible exposure rather than tolerance exposure.

During this decade, the newly reconstituted ICRP began consideration of the implications of linear non-threshold dose-response relationships for the late biological effects of radiation. The pre-war concept of "tolerance" doses might appear to imply the concept of a threshold dose. As noted by L.S. Taylor (20), an original member of ICRP and the preceding International Committee on X-ray and Radium Protection, the concept of a threshold was not explicitly discussed. Rather, "the setting of the tolerance level was on the basis of whether or not effects could be observed, and this has been the common approach to similar problems for all other toxicological agents."

As a result of the work of H.J. Muller and other geneticists on fruit flies and other lower organisms, non-threshold linearity for genetic effects of radiation was generally accepted by biologists in the 1940's (15,16,20). From the point of view of a geneticist who was formerly a member of ICRP, there was "an understandable reluctance on the part of [medical] radiologists to believe that by administering what they considered to be low doses they were causing any harm" (21). There was moreover at that time no reliable data from which the quantitative implications for human beings of work on fruit flies could be assessed; the required animal data were only to be accumulated, at considerable effort, at Oak Ridge and other research laboratories over the next few decades.

The ICRP recommendations of 1950 (18) did indicate that "while the values proposed for maximum permissible exposures are such as to involve a risk that is small compared to the other hazards of life, nevertheless in view of the unsatisfactory nature of much of the evidence on which our judgements must be based, coupled with the knowledge that certain radiation effects are irreversible and cumulative, it is strongly recommended that every effort be made to reduce exposures to all types of ionizing radiations to the lowest possible level." The ICRP recommendations of 1954 (19) include the statement that no increment in radiation dose rate can be regarded as absolutely safe. These basic principles have been adhered to in ICRP recommendations since that time.

NATIONAL HEALTH AND WELFARE. During this period, a radiation protection service was inaugurated within the Industrial Health Division of the Department of National Health and Welfare in January, 1950. At this time, AECB staff consisted of a very small number of persons. The problems arising from developments in the fields of nuclear energy and nuclear medicine, the growing recognition of the need for increased safety precautions in the use of X-rays, and concern about the possible effects of radiation exposure of members of the public from all sources led to a rapid expansion of these radiation protection activities. These activities resulted in establishment of the Radiation Protection Division (later designated Radiation Protection Bureau and more recently the Bureau of Radiation and Medical Devices) as a separate division within the federal department of Health and Welfare; one of its principal functions was to act as health advisor to AECB and to the provinces. A film monitoring dosimetry service for radiation workers in Canada was established in 1951 (22) at the request of the Dominion Council of Health. Shortly after the first U.S. "fusion" or hydrogen-bomb tests in the Pacific Ocean in 1954, increased effort was devoted to measurement of radioactive fallout and assessment of its potential health effects on members of the general population. Recommendations of the Radiation Protection Division followed closely those of the ICRP (22).

This period finished, then, with many basic ideas in place, a system of physical units, and of biologically-related units suitable for use in radiation protection. Organizations were in place both internationally and nationally, including in Canada. Although at this time there were no extensive official regulations for radiation protection in Canada, practice in the Canadian Atomic Energy Project was in advance of the current recommendations of ICRP, primarily because of the expertise of the biologists and health physicists associated with this Canadian organization at that time.

1956-1965: Canadian Regulations

At the start of this period the ICRP was working towards its Publication No. 1 which duly appeared in 1959 (23). There were some key changes in the ICRP's approach in this document. The publication starts by noting that the previous permissible levels of exposure had been expressed in terms of the dose in a rather short interval of time - one day or one week - and that it had been assumed that if this average dose rate was low enough no appreciable bodily injury would become apparent in the lifetime of the individual. By now it was increasingly felt that the accumulation of small doses might result in some long-term biological damage being expressed, notably genetic effects in the descendants of exposed individuals. The concept of a linear, non-threshold dose-response relationship for induction of late effects was apparently accepted by the Commission, although some doubt was expressed as to whether or not there was a threshold for induction of leukemia by X-rays and of bone cancer by radium (23).

Accumulation of both somatic and genetic damage in the individual was therefore limited by a formula which ensured that the average annual dose to the whole body or to critical organs would not exceed 5 rem per year from age 18 onward whereas the recommended maximum for any given year was 12 rem (23). A quarterly limit of 3 rem in any period of 13 consecutive weeks was also recommended. Single doses of the order of 3 rem were to be avoided as far as practicable especially in the case of women of reproductive age.

Concurrent with the production of this publication, the draft for new regulations in Canada was being prepared by the AECB, which was advised by personnel from the Radiation Protection Division of National Health and Welfare, from Atomic Energy of Canada Limited (AECL) and from the Departments of Health and Labour in Ontario. Following a 1959 recommendation of the Dominion Council of Health, health and safety matters were specifically addressed in the new Atomic Energy Control Regulations which appeared in 1960. These regulations were, by and large, consistent with ICRP Publication 1 (23). They were slightly more conservative in the sense that in addition to a quarterly limit of 3 rem to radiation workers there was also a limit of 5 rem in any 52 consecutive weeks. Special dispensation of the Board was needed in order to invoke the age formula. Employment of pregnant women as atomic radiation workers was prohibited. These regulations applied specifically to persons using radioactive materials; the use of medical X-rays was not and is not regulated by AECB. However, several of the provinces had passed legislation governing the use of X-rays by the end of this period (22); in general, the legislation also conformed to ICRP recommendations (23).

The Canadian Atomic Energy Project had meanwhile been reorganized as Atomic Energy of Canada Limited (AECL). It is interesting to note that AECL never used the age formula and, because of its contacts with the ICRP, adopted the 5 rem whole body annual limit towards the end of 1956. There were, however, some problems with the film badges used to record the whole body exposures of radiation workers. These films overestimated the radiation doses from low energy X-rays (24) so that the whole body doses recorded were somewhat higher than those actually received. Although various improvements in the film badges were made during this period, this problem was not really solved until thermoluminescence dosimeters were introduced in 1973 (24).

ICRP Publication 2 also appeared in 1959 (25). This included a number of minor amendments to ICRP Publication 1, emphasizing for example that occupational doses to medical workers were included in the recommended dose limits, although doses to patients were excluded, that the recommended limits on exposure of members of the general population applied to individuals in this population and that limitation of the average exposure of the whole population were a matter for interpretation by responsible national authorities, and that potential damage to foetal tissues of pregnant women presented a special risk problem. The main body of this publication was, however, concerned with maximum permissible concentrations in air and water of some 278 radionuclides and with methods used to calculate these values using a model of constant body burden maintained by constant intake. Maximum permissible concentrations of radon and radon daughters were reduced 3-fold from those recommended in 1954. This publication (25) was to serve as a standard reference in most radiation protection circles for many years to come.

The recommendations of ICRP Publication 6 in 1964 (26) incorporated further refinements. The term "dose equivalent" was used to specify rems, and the term "quality factor" was introduced to replace RBE for radiation protection purposes, in order to avoid confusion with the use of RBE by radiobiologists to describe the results obtained in individual experiments on specific biological endpoints. A maximum permissible dose of 1.3 rem in a quarter year was recommended for women of reproductive age, with a maximum of 1 rem to the foetus throughout the remainder of pregnancy after a pregnancy has been diagnosed

(presumed to occur within two months after conception). The recommendations (26) also include the statement "it appears possible on some theoretical and experimental grounds that when either the total dose or the dose-rate [of X-, gamma- and beta-rays] is very low any [carcinogenic] effects will be directly proportional to the total dose and independent of dose-rate. This assumption is implicit in past recommendations on permissible levels and although confirmatory proof is lacking it is believed to be a reasonable basis for assessment." The concept of a linear dose-effect relationship for genetic effects was reconfirmed.

The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) was established in 1955. Its purpose was to collect and evaluate reports on the levels of ionizing radiation and radioactive substances in the environment and on the biological effects of these radiations on humans. Many Canadian scientists and agencies have contributed to the work of this committee, which continues to issue valuable scientific reviews of the above topics. Although UNSCEAR works closely with scientific representatives from the ICRP and from various national radiation protection agencies, it does not issue recommendations concerned with radiation protection. Its second report, issued in 1962, included comparative risks of induction of cancer and genetic disorders from the main sources of ionizing radiation but did not put any quantitative estimates on actual risks per unit dose received (27). This topic became one of the major concerns of this committee in later years as relevant research data became available.

1966-1975: Quantification of Risks

The ICRP set the scene early in this period with its first attempt to estimate quantitatively the potential carcinogenic and genetic effects of exposure to low levels of radiation (28). Developmental abnormalities resulting from irradiation of the foetus were also reviewed but no quantitative risk estimates were derived. The results of this effort are summarized in Table A1, together with more recent quantitative estimates provided by other scientific committees. It can be seen that these first ICRP estimates in 1966 are now thought, in the light of further information accumulated since that time, to have overestimated the total number of serious genetic diseases summed over all generations after radiation exposure of parents. However, the concept of a quantitative risk per unit dose had been established.

TABLE A1

SOME ESTIMATES OF THE CARCINOGENIC AND GENETIC RISKS OF LOW DOSES OF IONIZING RADIATION

Source	Cancers per 10^4 person-rem or 10^2 person-Sv		Genetic diseases per 10^4 person-rem of 10^2 persons-Sv [a]	
	Fatal	Total	First generation	Summed over all generations
ICRP 1966 (28)	≥0.4	≥0.6	0.2	85
UNSCEAR 1972 (29)	≥0.7-1.4	≥1.25-3.2	0.06-0.15	3
BEIR 1972 (30)	1.5-2	3-4	0.12-2	0.6-15
UNSCEAR (1977 (31)	1	2	0.2 -0.6	1.85
ICRP 1977 (32)	1.0 males, 1.5 females	2.5	0.5 [b]	2
BEIR 1980 (33)	0.7-2.3 [c]	1-3	0.05-0.75	0.6-11
UNSCEAR 1982 (34)	~1	-	0.2	1.5

Footnotes:

[a] The risk factors given for radiation-induced genetic diseases apply to exposures prior to parenthood; for exposure of the general population or a group of radiation workers of all ages, these risk factors should be multiplied by 0.4 (32) since six-tenths of the population are beyond the average age at which they become a parent, and consequently six-tenths of the total exposure is not genetically significant.

[b] This value is assumed to be roughly half that given in ICRP 1977 (32) for the sum of induced genetic diseases in the first and second generation combined.

[c] The cancer risk estimates in BEIR 1980 apply to low LET radiation only. The text is not clear but seems to imply similar values for high LET radiations.

The annual maximum permissible exposures did not change appreciably in the next formal recommendations of ICRP in its Publication 9: five rem per year for gonads, red bone marrow and the whole body, with special restrictions for women of reproductive age and for pregnant women. For individual members of the general public, this value was to be divided by 10.

These recommendations of ICRP were incorporated in the revised Canadian regulations which were issued in 1974, and which remained in effect through 1986, with only two additions which are noted later. The protection of uranium miners continued to be regulated mainly by the provinces, as it had traditionally been, until 1978.

Ontario Hydro began to play a major role in practical radiation protection in Canada (35) with the establishment of large nuclear power generating stations at Douglas Point [1967], Pickering [1971] and Bruce [1975] during this decade. The tradition was continued with the entry of the provinces of Quebec and New Brunswick into the area of nuclear power generation. Courses in radiation protection were established for workers in the nuclear generating division of Ontario Hydro and the ICRP principle of keeping radiation exposures of workers as low as reasonably achievable was emphasized from the beginning of this program (35). Equally important has been improvement in the design criteria for these reactors. The design target for the Pickering reactors, a target which has in fact usually been achieved, was a maximum of 5 millirem per year, or 1/100th of the ICRP recommended limit, for those maximally-exposed members of the general public who might live continuously and grow their own food near the generating site. Design improvements have also been largely responsible for a marked drop in total occupational exposures from more than 1 to about 0.1 person·rem per megawatt·year of electrical energy produced. It is also of interest to note that Ontario Hydro was the first Canadian organization to establish during this decade a continuing annual follow-up of the mortality of its current and pensioned employees in order to ascertain the potential impact of occupational exposure to radiation on the health of its employees (36).

Meanwhile, the concept of quantitative risk as the basis for dose limitation was being further developed and formalized by the ICRP.

1976-1985: Principles and Sophistication

By 1977 the stated radiobiological assumption underlying the recommendations of the ICRP (32) was that the probability of cancer induction in exposed individuals and hereditary changes affecting future generations is linearly related to dose without any threshold. Some ambiguities in the original wording of the 1977 recommendations (32) were clarified by a 1978 statement (37) to indicate that "these risk estimates are intended to be realistic estimates of the effects of radiation at low annual dose equivalents." These recommendations (32) are based on quantitative assessments of risk to the individual and of collective harm to society. Absolute safety is not a credible aim except with respect to non-stochastic radiation effects such as cataracts or burns for which there clearly is a threshold. The critical organ concept was replaced by the total risk concept, with total risk being the sum of the risks to the individual organs that are exposed. The risk factors for individual organs are given in Table A2. The quality factor for alpha particles was raised to 20, as suggested by the ICRP in 1973 (38). The personal risks from successive years of exposure have to be considered as cumulative. The collective harm to society from low doses to large numbers of people is most conveniently indicated by the collective dose. All exposures were to be kept as low as reasonably achievable (ALARA), economic and social factors being taken into account. The new SI units were introduced, replacing rems with sieverts, where 1 rem equals 0.01 sievert. The whole body dose limit for radiation workers remained at 5 rem or 50 mSv per year (32). However, new limits were recommended for exposure of individual

organs by internal radionuclides, depending upon the biological risk and resultant weighting factor assigned to each individual organ [Table A2]. An overriding limit of 500 mSv per year was imposed on individual organ doses in order to prevent development of non-stochastic effects (32); the dose limit for the lens of the eye was restricted to 300 and later to 150 mSv per year.

TABLE A2

RISK FACTORS AND WEIGHTING FACTORS FOR INDIVIDUAL ORGANS AND TISSUES (32)

Organ or tissue	Estimated stochastic risk per 10^4 person-rem or		Weighting factor
	Fatal cancers [a]	Genetic disease in children plus grandchildren [b]	
Gonads	-	0.4	0.25
Breast (average for male & female)	0.25	-	0.15
Red bone marrow	0.2	-	0.12
Lung	0.2	-	0.12
Thyroid	0.05	-	0.03
Bone surfaces	0.05	-	0.03
Other tissues	0.5 [c]	-	0.30 [c]
Skin	-	-	- [d]
Whole body	1.25	0.4	1.0

Footnotes:

[a] Non-fatal or curable cancers induced by radiation were not considered in deriving weighting factors for individual organs.

[b] Estimated genetic risks apply to an average group of persons of all ages.

[c] The ICRP recommended that a weighting factor of 0.06 be applied to each of the five remaining organs or tissues that receive the highest dose equivalents.

[d] A weighting factor of 0.01 to account for fatal radiation-induced skin cancers was recommended by ICRP in 1978; this value is usually too small to have an appreciable effect in calculations of effective dose equivalent.

One result of these new recommendations was an extensive ICRP publication (39) defining annual limits on intake for occupational exposures to a wide variety of radionuclides. These limits were derived using the principles outlined in ICRP Publication 26 (32) plus a great deal of information that had been accumulated since 1959 on the physical characteristics, metabolism and retention of various radionuclides. These new derived limits on intake were higher in some instances and lower in others compared to the values derived from ICRP Publication 2 (25). One change between 1959 (25) and 1979 (39), that related to radium-226 in drinking water, might be noted. The ICRP in 1950, 1954 and 1959 had adopted the principle that the total amount of fixed radium in the bone should not exceed 0.1 μCi. Two metabolic models were considered in 1959 (25); because of the uncertainties involved at that time, the more conservative model providing the lower maximum permissible concentration in drinking water was selected. Recommended in 1959 were 100 pCi or 3.7 Bq per litre of drinking water for radiation workers, or 1/30th of this concentration for the general public (25). By 1973 (40), it had become apparent that the more restrictive metabolic model was incorrect. The 1979 ICRP recommendations (39) permit up to 100 Bq of radium-226 per litre of drinking water for radiation workers. The derived limit for fixed radium-226 in the bone is within 40% of the values recommended in 1941 (17) and 1959 (25). Canadian federal guidelines for maximum permissible concentration and for desirable or "target" concentration in drinking water for the general public were arbitrarily set by National Health and Welfare (41) at one-hundredth and one-thousandth of this new occupational limit [Table A3].

TABLE A3

MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATIONS OF RADIUM-226 IN DRINKING WATER

Population	Maximum permissible concentration in drinking water (Bq per litre)	Approximate effective dose equivalent in mSv per year
Radiation workers (ICRP 1979) (39)	100	20 [a]
Canadian public (NHW 1978) (41)		
- maximum permissible	1	0.2
- desirable target	0.1	0.02

[a] The effective dose equivalent associated with the occupational limit is about 20 mSv per year, rather than 50 mSv per year, because maximum concentrations in drinking water are restricted by a non-stochastic limit of 500 mSv per year to bone surfaces.

Although the ICRP has long recommended that exposures of patients resulting from the application of X-rays and other sources of ionizing radiation in the healing arts should be exempt from legislative limits, it continues to follow the established tradition (19) of recommending practical methods for protection of the patient in diagnostic radiology (42).

Two important changes in the Canadian regulations were introduced during this recent period.

No specific limit on exposure of uranium miners to radon progeny was indicated in the Canadian regulations prior to 1978. Maximum permissible exposure to radon daughters in Ontario mines was set by the province at 12 WLM per year in 1967 (43). [1 WLM or working level month was defined as exposure for 170 hours to one WL, ie. to a concentration of 100 pCi or 3.7 Bq per litre air of radon in equilibrium with its short-lived radioactive progeny.] This provincial standard was compatible with the 1954 ICRP recommendations (19) and with established US standards; a review of relevant data can be found elsewhere (see for example, 44). There had, however, been concern expressed after the ICRP in 1959 had recommended a maximum permissible exposure equivalent to 4 WLM per year (25). Following the official recommendations resulting from an extensive survey of the health and safety of Ontario miners in 1976 (43), AECB imposed an occupational limit of 4 WLM per year in 1978, a limit which had been applied in Ontario mines since 1975 (43). The implications of more recent ICRP recommendations in this context (45) have been considered in more detail in section 4.5 of the main text.

The other change in Canadian regulations occurred in 1985 and allowed for equality of employment opportunity for non-pregnant women by eliminating the more restrictive dose limits for non-pregnant female radiation workers (46). Further details are given in section 4.6 of the main text.

A new set of Canadian regulations is currently being drafted by AECB (47), which had established a system of issuing consultative documents for public and scientific comment before new regulatory measures are established. The new regulations will be issued only after due consideration of all comments received.

Summary

Historical highlights relevant to radiation protection in Canada up to 1985 have been reviewed. Soon after the initial period of discovery of ionizing radiations in the 1890's came the realization that protection was needed. A growing concern led to collective appraisals and to the development of the relevant basic sciences. The advent of atomic energy in 1945 brought increased emphasis on and capability for protection. The Atomic Energy Control Act was part of the worldwide expansion of atomic energy and public awareness that led eventually to quantitative federal and provincial regulations in Canada. As ICRP has developed its ideas, with considerable input from Canadian scientists, so the Canadian and provincial regulations in the field of radiation protection have been developed. Currently we are anticipating a new set of Canadian regulations that reflect the recommendations of the ICRP.

Acknowledgements

The material in this appendix was adapted by D.K. Myers from a paper by A.M. Marko and R.V. Osborne presented at the annual meeting of the Canadian Radiation Protection Association in St. John, New Brunswick, 1985 June 11-13, on the ninetieth anniversary of the discovery of X-rays. Other sources of information include an unpublished manuscript (A History of the Development of Radiation Protection) from 1971 by C.G. Stewart and the original documents cited in the reference list.

References for Appendix A

(1) Roentgen, W.C. Eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte der Physik. Med. Ges. Wurzburg, p.132 (1895).

(2) Becquerel, H. Sur les radiations émises par phosphorescence. Compt. rend. Acad. d. Sci. 122, p.420 (1896).

(3) Rolleston, H. Harmful effects of irradiation: a critical review. Quart. J. Med. 23, p.101 (1930).

(4) Spear, F.G. Radiations and Living Cells. John Wiley and Sons Inc., New York (1953).

(5) Frieben. Cancroid des rechten Handrückens. Deutsche Med. Wochenschr. 28, p.335 (1902).

(6) Becquerel, J. and Curie, P. Action physiologique des rayons du radium. Comp. rend. Acad. d. Sci. 132, p.1289 (1901).

(7) Rollins, W. Notes on X-ray light vacuum tube burns. Boston Med. Sci. J. 146, p.39 (1902).

(8) Mutscheller, A. Physical standards of protection against roentgen ray dangers. Amer. J. Roentgenol. 13, p.65 (1925).

(9) Taylor, L.S. History of the International Commission on Radiological Units and Measurements. Health Physics 1, p.306 (1958).

Taylor, L.S. History of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Health Physics 1, p.97 (1958).

Taylor, L.S. Brief history of the National Committee on Radiological Protection and Measurement (NCRP) covering the period 1929-1946. Health Physics 1, p.3 (1958).

(10) Fricke, H. and Glasser, O. Standardization of the roentgen-ray dose by means of the small ionization chamber. Amer. J. Roentgenol. 13, p.462 (1925).

(11) International Recommendations for X-ray and Radium Protection. Brit. J. Radiol. 7, 83 (1934).

(12) X-ray Protection. National Bureau of Standards Handbook No. 20, U.S. Department of Commerce (1936).

(13) Muller, H.J. The effects of roentgen rays upon hereditary material. In: The Science of Radiology. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois (1933).

(14) International Recommendations for X-ray and Radium Protection. Brit. J. Radiol. 10 (1937).

(15) Mitchell, J.S. Memorandum on some aspects of the biological action of radiations, with especial reference to tolerance problems. Document I-17, National Research Council, Atomic Energy Project, Montreal (1945).

(16) Butler, G.C. The biological basis of maximum permissible exposures for workers in the field of atomic energy. Document M.I.-2, National Research Council Atomic Energy Project, Chalk River (1947).

(17) Safe Handling of Radioactive Luminous Compounds. National Bureau of Standards Handbook H-27, U.S. Government Printing Office, Washington (1941).

(18) International Recommendations on Radiological Protection, July 1950. Published for distribution in Canada by the Department of National Health and Welfare, Ottawa. (Also published as Handbook 47 by the U.S. National Bureau of Standards and in Brit. J. Radiol. 24, Jan. 1951).

(19) Recommendations of the ICRP, Dec. 1954. Brit. J. Radiol., Supplement No. 6 (1955).

(20) Taylor, L.S. Radiation Protection Standards. CRC Press, Cleveland, Ohio (1971).

Taylor, L.S. Organization for Radiation Protection; The Operations of ICRP and NCRP 1928-1974 (1979).

(21) Newcombe, H.B. Nuclear risks. Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-6477 (1979).

(22) Bird, P.M. Radiation protection in Canada, parts I to III. Canad. Med. Assoc. J. 90, pp.1024, 1075 and 1114 (1964).

(23) ICRP Publication 1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press (1959).

(24) Cowper, G. Radiation exposure records in AECL; G1. External radiation. Appendix G in: A study of the health of the employees of Atomic Energy of Canada Limited by J.L. Weeks. Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-6813 (1981).

(25) ICRP Publication 2. Recommendations of the ICRP and Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation. Pergamon Press (1959).

(26) ICRP Publication 6. Recommendations of the ICRP. Pergamon Press (1964).

(27) Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. A/5216. General assembly official records 17th session, suppl. no. 16. United Nations, New York (1962).

(28) ICRP Publication 8. The evaluation of risks from radiation. Pergamon Press (1966).

(29) UNSCEAR Report. Ionizing radiation: levels and effects. United Nations, New York (1972).

(30) BEIR Report. The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. National Academy of Sciences, Washington (1972).

(31) UNSCEAR Report. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, New York (1977).

(32) ICRP Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, vol. 1, no. 3 (1977).

(33) BEIR III Report. The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. National Academy of Sciences, Washington (1980).

(34) UNSCEAR 1982 Report. Ionizing Radiation: sources and biological effects. United Nations, New York (1982).

(35) Ontario Hydro Radiation Protection Regulations 1962. Ontario Hydro, Toronto (1962).

Wilson, R., et al. The application of ALARA in Ontario Hydro. Paper presented at Health Physics Society Annual Meeting, Chicago, 1985. Report HSD-IR-85-6, Ontario Hydro, Toronto (1985).

Wilson, R., et al. Occupational dose reduction experience in nuclear power stations. Report HSD-IR-85-1, Ontario Hydro, Toronto (1985).

(36) Anderson, T.W. Ontario Hydro Mortality 1970-1982. Health and Safety Division, Ontario Hydro, Toronto (1983).

(37) Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP, vol. 2, no. 1 (1978).

(38) ICRP Publication 21. Data for protection against ionizing radiation from external sources: supplement to ICRP publication 15. Pergamon Press (1973).

(39) ICRP Publication 30. Limits for intakes of radionuclides by workers. Annals of the ICRP, vol. 2, no. 3/4 (1979) to vol. 8, nos. 1-4 (1982).

(40) ICRP Publication 20. Alkaline earth metabolism in man. Pergamon Press (1973).

(41) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality. Health and Welfare Canada, Ottawa (1978).

(42) ICRP Publication 34. Protection of the patient in diagnostic radiology. Annals of the ICRP, vol. 9, no. 2/3 (1982).

(43) Report of the Royal Commission on the Health and Safety of Workers in Mines; J.M. Ham, Commissioner. Government of Ontario, Toronto (1976).

(44) Myers, D.K., et al. Review of epidemiological studies on hazards of radon daughters. p.513 in Radiation Hazards in Mining (ed. M. Gomez), Society of Mining Engineers, New York (1981).

(45) ICRP Publication 47. Radiation protection of workers in mines. Annals of the ICRP, vol. 16, no. 1 (1986).

(46) Atomic Energy Control Regulations, amendment. Registration SOR/85-335. Canada Gazette Part II, vol. 119, no. 9, p.1884 (April, 1985).

(47) Consultative Document C-83. Proposed general amendments to the Atomic Energy Control Regulations. Atomic Energy Control Board, Ottawa (1986).

APPENDIX B

CANADIAN PARTICIPATION IN ICRP AND UNSCEAR

A list of Canadian representatives who have officially participated in the preparation of ICRP and UNSCEAR reports is given below. This list does not include many Canadian scientists who provided valuable suggestions but who did not participate in the meetings of these committees and whose names are not recorded in official documents.

ICRP participants have been indicated as members of the main commission or of one of the ICRP committees. UNSCEAR participants have been indicated as official representatives of Canada or scientific advisors (or members of the secretariat). In this case, the date given is that of publication of the final UNSCEAR report in the preparation of which the person participated.

ICRP

	Main Commission	Committee
J. Bouchard		1956-59
G.C. Butler		1962-79
A.J. Cipriani	1950-56	1953-56
C. Garrett		1956-62
H.E. Johns		1956-62
J.R. Johnson		1984- [a]
C.A. Mawson		1956-62
H.B. Newcombe	1965-77	1959-73
R.V. Osborne		1981-89
F.D. Sowby		1956-62 [b]
C.G. Stewart	1962-77	1956-69
E.A. Watkinson	1956-62	1953-59
R. Wilson		1977-81

Footnotes: [a] ICRP task group on lung dosimetry.

[b] Secretary to the main commission 1962-1984.

UNSCEAR

	Representative	Advisor
J.D. Abbatt		1969
R.K. Appleyard		1958, 1962
P.J. Barry		1969, 1972
P.M. Bird		1958, 1962
A.H. Booth		1966, 1977
W.R. Bush		1977, 1982, 1986
G.C. Butler	1964, 1966, 1969 [a], 1972, 1977, 1982	1986
H. Cameron		1962
J.S. Haskill		1972
C. Hunter		1958
W.E. Grummitt		1962, 1964, 1966, 1969
A.P. James		1962, 1972
G.H. Josie		1958, 1962
E.G. Letourneau	1982, 1986	
A.M. Marko	1982, 1986	
C.A. Mawson		1958
B.B. Migicovsky		1962
E. Muller		1982
D.K. Myers		1982, 1986
H.B. Newcombe		1958, 1962, 1964, 1966
F. Prantl		1982
H.C. Rothschild		1977, 1982
F.D. Sowby		1958
J.B. Sutherland		1969
B.K. Trimble		1977
E.A. Watkinson	1958, 1962	

Footnote: [a] UNSCEAR Chairman.

ACKNOWLEDGEMENTS

ADVISORY COMMITTEE ON RADIOLOGICAL PROTECTION

WORKING GROUP ON BASIC OBJECTIVES OF RADIATION PROTECTION

A.M. Marko - Chairman

P. Lachance

E.G. Létourneau

H.B. Newcombe

D.K. Myers

ACRP Advisory Committee on Radiological Protection

CCRP Comité consultatif de la radioprotection

Advisory Committees of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comités consultatifs de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

COMMITTEE REPORTS

Since the 1950's the Atomic Energy Control Board has made use of advisory committees of independent experts to assist it in its decision-making process. In 1979 the Board restructured the organization of these consultative groups, resulting in the creation of two senior level scientific committees charged with providing the Board with independent advice on principles, standards and general practices related to radiation protection and the safety of nuclear facilities. The two committees are the Advisory Committee on Radiological Protection (ACRP), formed in 1979, and the Advisory Committee on Nuclear Safety (ACNS), which was established a year later. Summaries of meetings of the committees are available to the public in the AECB library in Ottawa.

From time to time the committees issue reports which are normally published by the AECB and catalogued within the AECB's public document system. Committee reports, bound with a distinctive cover, carry both a committee-designated reference number, e.g. ACRP-1, and an AECB reference number in the "INFO" series. The reports generally fall into two broad categories: (i) recommendations to the Board on a particular technical topic, and (ii) background studies. **Unless specifically stated otherwise, publication by the AECB of a committee report does not imply endorsement by the Board of the content, nor acceptance of any recommendations made therein.**

RAPPORTS DES COMITÉS

Depuis les années cinquante, la Commission de contrôle de l'énergie atomique fait appel à des comités consultatifs composés d'experts indépendants pour l'aider dans ses prises de décision. En 1979, la CCEA a restructuré l'organisation de ces groupes de consultation pour former deux comités scientifiques supérieurs chargés de lui fournir des conseils indépendants concernant les principes, les normes et les méthodes générales touchant la radioprotection et la sûreté des installations nucléaires : ce sont le Comité consultatif de la radioprotection (CCRP), formé en 1979, et le Comité consultatif de la sûreté nucléaire (CCSN), établi l'année suivante. Le public peut consulter les comptes rendus des réunions de ces comités à la bibliothèque de la CCEA, à Ottawa.

Les comités rédigent à l'occasion des rapports qui sont normalement publiés par la CCEA et catalogués dans la collection des documents publics de la CCEA. Reliés avec une couverture distincte, les rapports des comités se reconnaissent à leur numéro de référence du comité d'origine (comme CCRP-1) et à leur numéro de référence de la CCEA dans la série «INFO». Ils se divisent habituellement en deux catégories générales : (i) les recommandations présentées à la Commission au sujet d'une question technique particulière; (ii) les études générales. **À moins d'indication contraire, la publication par la CCEA du rapport d'un comité ne signifie pas que la Commission approuve le contenu de la publication, ni qu'elle en accepte les recommandations.**

Advisory Committees of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comités consultatifs de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

INFO-0340 (F)

ACRP Advisory Committee on Radiological Protection

CCRP Comité consultatif de la radioprotection

CCRP-11

PRINCIPES DE RADIOPROTECTION AU CANADA

par le Comité consultatif
de la radioprotection

Approuvé par la CCEA pour
publication en février 1988

Publié en mars 1990

An Advisory Committee of the Atomic Energy Control Board of Canada — Secretariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

Comité consultatif de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada — Secrétariat: Ottawa, Canada K1P 5S9

PRINCIPES DE RADIOPROTECTION AU CANADA

RÉSUMÉ

Le but principal de la radioprotection au Canada est d'assurer que les personnes, leurs descendants et toute l'humanité soient bien protégés contre le danger qui pourrait découler d'irradiations indues aux rayonnements ionisants. Le présent rapport traite des principes fondamentaux de radioprotection et des organismes qui s'occupent de protection contre les rayonnements ionisants.

On part du principe que l'irradiation par de faibles doses de rayonnements ionisants à de faibles débits de doses augmentent le nombre de cas de cancer fatal et de tares génétiques chez les humains d'une petite fraction qui croît en proportion directe à la dose de rayonnement totale. Le taux des tares génétiques et somatiques dus à des débits de doses de rayonnement inférieurs aux limites réglementaires (50 mSv par année) sont trop faibles pour être mesurés séparément du taux normal de ces maladies. Ils sont donc déterminés à partir de calculs estimatifs acceptés internationalement d'après des données épidémiologiques et autres qui sont obtenus à des doses beaucoup plus élevées.

La radioprotection se fonde sur trois principes : a) aucune pratique ne doit être adoptée à moins d'entraîner un avantage net pour la société; b) toute exposition doit être maintenue au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux, et c) les doses individuelles ne devraient pas dépasser les limites annuelles prévues. La limite actuelle pour les travailleurs sous rayonnements est de 50 mSv par année et les irradiations des membres du public ne devraient pas dépasser une petite fraction de la limite qui s'applique aux travailleurs sous rayonnements. Dans le cas du deuxième principe énoncé ci-dessus, une procédure recommandée à travers le monde pour déterminer ce qui est «raisonnablement possible» est d'optimiser les procédures de radioprotection d'après des analyses coûts-avantages.

D'autres domaines de la radioprotection, comme la limitation des doses collectives (soit la somme des doses individuelles de toutes les personnes irradiées), les règles d'exemption les doses de rayonnement ou les quantités de matières radioactives qui sont infimes, les risques au travail dans les mines d'uranium, ainsi que les règles spéciales pour protéger le foetus des travailleuses sous rayonnements qui sont enceintes, ont suscité beaucoup d'intérêt au Canada. Il incombe à la Commission de contrôle de l'énergie atomique, au ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social, aux autorités provinciales, aux titulaires de permis et aux travailleurs sous rayonnements d'appliquer les principes de radioprotection. Le rapport décrit brièvement le rôle de chacun de ces organismes.

ADDENDUM

Une récente déclaration de la CIPR, à la suite de sa réunion de septembre 1989 à Como, indique que les estimations de risque de cancer fatal dû aux rayonnements ionisants pourraient être doublées depuis que les doses estimées provoquées par les bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki ont été révisées. Cette déclaration de précaution doit être considérée lors de l'interprétation de ce document.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
RÉSUMÉ		i
ADDENDUM		i
1.	EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS	1
1.1	Introduction	1
1.2	Effets stochastiques	1
1.3	Effets non stochastiques	6
1.4	Buts de la radioprotection	6
2.	ORGANISMES INTERNATIONAUX	7
2.1	Aperçu général	7
2.2	Commission internationale de protection radiologique	9
3.	RECOMMANDATIONS INTERNATIONALES	10
3.1	Justification des pratiques	10
3.2	Optimisation de la radioprotection (principe ALARA)	10
3.3	Limites de doses individuelles	11
4.	APPLICATIONS DES PRINCIPES DE RADIOPROTECTION DANS CERTAINS DOMAINES	13
4.1	Principe ALARA	14
4.2	Engagement de dose collective	15
4.3	Concept *de minimis*	16
4.4	Quantités réglementaires	17
4.5	Risque professionel en exploitation minière de l'uranium	18
4.6	Travailleuses sous rayonnements	19
5.	APPLICATION DES PRINCIPES DE RADIOPROTECTION	21
5.1	Rôle de la Commission de contrôle de l'énergie atomique	21
5.2	Rôle du ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social	21
5.3	Rôle des provinces	22
5.4	Responsabilités des titulaires de permis	23
5.5	Responsabilités des travailleurs	24
6.	RÉFÉRENCES	26
GLOSSAIRE		31
ANNEXE A.	Histoire de la radioprotection au Canada	36
ANNEXE B.	Participants canadiens auprès de la CIPR et de UNSCEAR	57
REMERCIEMENTS		59

1. EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS

1.1 Introduction

La radioprotection a pour but de maintenir des conditions sûres dans l'exécution de toute activité humaine qui fait appel aux différentes sources de rayonnements ionisants*.

Depuis deux siècles, on a découvert dans la nature plusieurs types de rayonnements allant des ondes hertziennes et des micro-ondes aux rayons X et gamma, en passant par les rayons infra-rouges, les rayons visibles et les rayons ultraviolets, et on leur a trouvé de nombreuses applications pratiques dans les sociétés industrialisées. Dans le présent document, toutefois, le mot «rayonnement» est utilisé pour désigner uniquement les rayonnements ionisants. Les rayonnements ionisants comprennent les rayons X*, les rayons gamma* et plusieurs particules subatomiques se déplaçant à grande vitesse. On les qualifie d'«ionisants» parce que la première méthode utilisée pour les mesurer dépendait de leur capacité à séparer les molécules gazeuses en ions. Les rayonnements ionisants peuvent aussi endommager les systèmes biologiques.

Les êtres humains, ainsi que tous les organismes vivants d'ailleurs, ont toujours été exposés aux rayonnements ionisants. Les niveaux actuels d'irradiation en Amérique du Nord (1,2) figurent au tableau 1. Bien que ces irradiations varient beaucoup d'une personne à l'autre (surtout dans le cas des irradiations médicales), ainsi que d'une partie du pays à l'autre, le débit moyen de dose totale*, exprimé en unités internationales (SI), est d'environ 3 millisieverts* (3 mSv) par année, dont les deux-tiers proviennent de sources naturelles. À cette intensité, la probabilité des effets biologiques nuisibles des rayonnements est si faible par rapport au taux normal de maladies qu'ils ne peuvent être ni mesurés ni décelés directement (1). Les estimations de risque possible ont été obtenues en extrapolant à partir des effets connus de doses de rayonnement plus élevées* aux environs de 1000 mSv (1,2,3).

1.2 Effets stochastiques

Les estimations acceptées actuellement de la probabilité de dommages sérieux pour les humains dus à de faibles doses de rayonnements ionisants figurent au tableau 2. L'annexe A donne un aperçu historique des autres estimations avancées par divers comités scientifiques. Ces probabilités sont exprimées en unités de dose de rayonnement au corps entier. En radioprotection, on suppose que la probabilité des effets biologiques particuliers énumérés au tableau 2 est directement proportionnelle à la dose de rayonnement totale reçue à des débits de dose faibles et qu'il n'existe aucune dose «sûre» ou dose seuil en deçà de laquelle ces effets ne se produiraient pas (figure 1). On qualifie de «stochastiques»* les effets biologiques qui suivent ce modèle (3).

[* Le glossaire donne la définition de certains termes et expressions marqués d'un astérisque la première fois qu'ils sont utilisés dans le texte.]

Tableau 1

Débits de dose moyens approximatifs des Nord-Américains dus à diverses sources de rayonnements ionisants (1,2)

Source	Équivalent de dose effectif (en millisieverts par année)
Sources naturelles	
- cosmiques	0,3
- terrestres	0,3
- radionucléides naturels internes	0,4
- produits de filiation du radon respirés	1 à 2
Sources artificielles	
- médecine et dentisterie	0,5 à 1 [a]
- retombées d'armes nucléaires (essais)	0,001 à 0,03
- toutes autres sources combinées	0,1
TOTAL	environ 3

[a] Une étude récente suggère que les doses moyennes dues aux rayons X et à des traceurs radioactifs utiles en diagnostics médicaux pourraient être aussi élevés que 2 mSv au Canada (4). Les données du tableau comprennent certaines valeurs qui figurent dans le rapport n° 93 du NCRP, intitulé "Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States".

Il existe de bonnes données biologiques à l'appui de cette dernière supposition dans le cas particulier des changements génétiques dus aux rayonnements*. Des expériences avec des bactéries, de la levure, certaines plantes et certains insectes ont prouvé qu'il existait une relation linéaire sans seuil entre la probabilité de changements génétiques et la dose totale accumulée à de faibles débits de dose de rayonnement (7). Des écarts par rapport à cette simple relation sont souvent observés dans des expériences biologiques où les doses de rayonnement élevées sont dues à des débits de doses élevés, mais ces écarts ne seront pas étudiés en profondeur dans le cadre du présent rapport, parce qu'ils sont peu importants en radioprotection dans des circonstances normales d'irradiation à de faibles doses.

Par ailleurs, il n'y a aucune preuve concluante de changements héréditaires chez les humains dus aux rayonnements. Toutefois, les données disponibles sont compatibles avec une relation de dose-réponse linéaire sans seuil pour les changements génétiques dus aux rayonnements chez d'autres mammifères (8), ainsi que chez les humains(9). Plus important encore, il n'existe aucune indication biologique qui montre que les mécanismes fondamentaux qui provoquent les changements génétiques dans l'ADN* (le porteur de toutes les données héréditaires dans tout organisme vivant) chez les humains se distinguent de ceux des autres organismes vivants, ou que la relation dose-réponse linéaire qu'on a prouvée dans le cas des changements génétiques dus aux rayonnements dans les organismes plus primaires ne devrait pas aussi s'appliquer aux humains.

Tableau 2

Estimations des risques biologiques dus à l'irradiation du corps entier de cohortes humaines à raison de faibles doses de rayonnement

Effets biologiques	Nombre prévu d'effets après l'irradiation de 100 000 personnes du public à 1 mSv chacune	
Cancer fatal	1,3	[a]
Cancer curable	1,3 à 2,3	[b]
Tares génétiques de tous les descendants de la population irradiée	1,6	[c]
Déficience mentale grave due à une irradiation *in utero**	0,1	[d]

[a] Une récente déclaration de la CIPR, à la suite de sa réunion de septembre 1987 à Como, indique que les estimations de risque de cancer fatal dû aux rayonnements ionisants pourraient être doublées depuis que les doses estimées provoquées par les bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki ont été révisées.

[b] La valeur supérieure de cette gamme comprend une grande part de cas curables de cancer de la peau qui pose de moins sérieux problèmes médicaux que la plupart des autres types de cancer (5). Il n'est pas sûr si le cancer de la peau est directement proportionnel à l'irradiation due à de faibles doses (6).

[c] On suppose que le risque de tares génétiques chez les descendants des deux parents irradiés avant la conception de leurs enfants s'élève à environ 4 par 100 000 par millisievert (2,3). Cette valeur est multipliée par 0,4 (3) pour tenir compte du fait qu'environ 60 pour 100 de la population générale a dépasse l'âge de procréer (l'âge moyen des parents à la naissance de leurs enfants est environ 30 ans et l'espérance de vie moyenne est d'environ 75 ans) (5), ce qui donne 1,6 par 100 000 dans le tableau. Dans le cas des expositions professionnelles, on tient compte seulement du risque des enfants et des petits-enfants (qui représente la moitié du risque total de toutes les générations) comme partie du risque professionnel des travailleurs, ce qui donne un facteur de risque de 0,8 par 100 000 si les deux parents sont irradiés, ou 0,4 par 100 000 pour chaque travailleur irradié.

[d] *On estime que le risque par 100 000 mères irradiées durant leur grossesse est de 10 par millisievert* (6). Cette valeur est multipliée par 0,01 pour tenir compte de la probabilité de 2 pour 100 qu'une femme de la population en général est enceinte à n'importe quel moment et du fait que la moitié de la population est composée d'hommes.

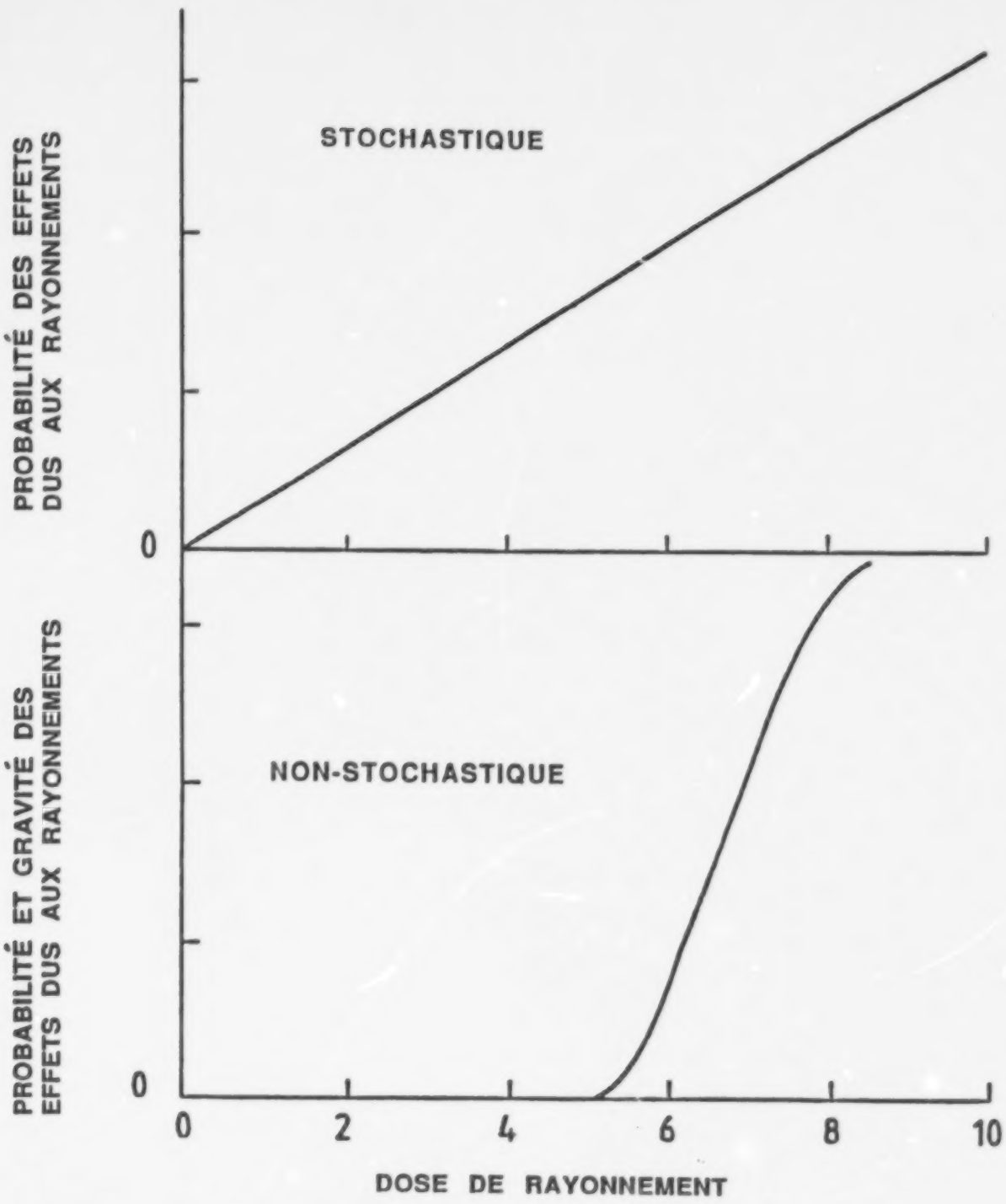

Figure 1. Schéma des relations dose-réponse pour les effets stochastiques et non stochastiques des rayonnements ionisants. Les échelles verticale et horizontale sont toutes deux données en unités arbitraires.

On a prouvé à plusieurs reprises que des doses de rayonnement élevées pouvaient provoquer le cancer* chez les humains. En revanche, il n'existe aucune preuve concluante de relation dose-réponse linéaire sans seuil entre de faibles doses et le cancer. Les arguments en faveur de la linéarité comprennent : (i) des indications selon lesquelles au moins un stade du cancer inclut des modifications à la structure de l'ADN semblables à celles qui sont responsables des changements génétiques (6,10); (ii) une indication que les doses de rayonnement relativement faibles peuvent augmenter l'incidence de certains types de cancer chez les humains et les cobayes animaux (2,11), et (iii) une indication que l'augmentation de certains types de cancer après irradiation due à des doses de rayonnement moyennes est cohérente avec une relation dose-réponse linéaire sans seuil (6). *L'hypothèse que l'augmentation de tous les cas de cancer dus aux rayonnements est directement proportionnelle à la dose de rayonnement accumulée à raison de faibles doses et de faibles débits de dose est donc une supposition prudente et sensée en radioprotection.*

Bien que les mécanismes responsables de provoquer la déficience mentale grave après l'irradiation *in utero** sont moins bien compris, les données limitées disponibles pour les humains semblent être compatibles avec la relation dose-réponse linéaire sans seuil (6). Les données épidémiologiques concordent aussi avec une dose seuil de quelques dizaines de millisieverts. Étant donné le premier facteur, il est considéré comme prudent au moins jusqu'à ce que plus de données soient disponibles, lorsqu'il s'agit de faibles doses, d'inclure cet effet avec les changements héréditaires et les cas de cancer (tableau 2) parmi ceux pour lesquels on croit que la fréquence augmente en proportion directe de la dose de rayonnement (6). La section 4.6 traite du sujet plus en profondeur.

Les estimations acceptées des probabilités de cas d'effets stochastiques (tableau 2) sont reconnus pour être d'une incertitude appréciable (1,2). Par exemple, un rapport scientifique (1) indique que le nombre probable de tares génétiques engendrés chez les enfants de parents irradiés pourraient être quatre fois inférieurs ou quatre fois supérieurs à la valeur moyenne adoptée par un autre rapport (2). De même, on est porté à croire que le risque de cas de cancer du poumon due à la respiration de produits de filiation du radon* peut être trois fois inférieur ou trois fois supérieur à la valeur recommandée (12). Le risque de cas de cancer fatal après irradiation du corps entier souffre également d'une incertitude importante. Les valeurs les plus probables peuvent être deux fois inférieures ou deux supérieures à la moyenne généralement acceptée (3), mais on fait face à une plus grande incertitude si l'on utilise d'autres modèles pour extrapoler des effets prévus mais non décelables de faibles doses à un faible débit de dose, à partir d'effets connus de doses de rayonnement élevées.

D'autres variables sont associées à l'âge et au sexe des personnes irradiées. Par exemple, le risque de cancer du sein dû aux rayonnements est beaucoup plus élevé chez les femmes que chez les hommes. Les effets de l'âge, lors de l'irradiation, varient probablement entre les différents types de cancer dus aux rayonnements (1,2). On croit généralement que le risque de tares génétiques dus aux rayonnements chez les enfants de parents irradiés est plus élevé si le père est irradié que la mère (2).

Comme dans la plupart des maladies, sans doute, il existe aussi des variations individuelles de susceptibilité aux effets dus aux rayonnements entre les membres de la population (1).

Tous les calculs estimatifs d'effets stochastiques dus aux rayonnements indiqués au tableau 2 sont sujets à être réexaminés par les comités nationaux et internationaux nommés à cette fin. *En radioprotection, il est cependant capital de fournir des calculs estimatifs du risque* qui ne grossissent pas exagérément ni ne sous-estiment les risques biologiques possibles à la personne moyenne de la population irradiée.* Les surestimations grossières de risques pourraient nuire à la société en détournant indûment une grande part des ressources sociétales limitées de la protection contre d'autres risques. Les sous-estimations grossières des risques stochastiques des rayonnements pourraient entraîner une protection insuffisante des travailleurs et du public en général. Les valeurs numériques indiquées au tableau 2 représentent les estimations courantes acceptées des risques stochastiques moyens.

1.3 Effets non stochastiques

D'autres effets biologiques des rayonnements, comme les brûlures cutanées, les cataractes, la stérilité, les vies écourtées par d'autres causes que le cancer, et la mort, ne sont provoqués que par de très fortes doses de rayonnement (figure 1). Ces effets «non stochastiques» ne sont pas observées si la dose de rayonnement se situe au-dessous d'un seuil particulier pour chaque effet non stochastique. Dans la plupart des cas, sauf peut-être pour le cristallin, un débit de dose de 500 mSv par année est au-dessous du seuil où tout effet non stochastique pourrait se produire (1,2,3). Le seuil qui engendrerait des effets non stochastiques varie normalement entre quelques sieverts et quelques dizaines de sieverts, si la dose de rayonnement est reçue dans un court laps de temps (1,2). Toutefois, la provocation d'effets non stochastiques, contrairement aux effets stochastiques, dépend beaucoup du débit de dose. À des débits de dose faibles, les effets non stochastiques ne sont pas produits par les rayonnements parce que toute petite fraction de cellules qui serait tuée dans un tissu serait remplacée durant le renouvellement normal des cellules dans le tissu.

1.4 Buts de la radioprotection

La radioprotection, comme l'affirme la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)* et comme le reconnaît le Comité consultatif de la radioprotection (CCRP)* au Canada, vise à prévenir tout effet non stochastique nuisible (c'est-à-dire empêcher toute brûlure cutanée de se produire, par exemple) et à «limiter la probabilité d'effets stochastiques à des niveaux jugés acceptables» (3). Les niveaux acceptables sont normalement considérés comme étant ceux qui assurent que les risques à la santé par suite de travaux sous rayonnement ne dépassent pas ceux des autres secteurs industriels dits «sûrs»* et que les risques du public en général se situent dans les échelons inférieurs des autres risques auxquels les membres du public sont exposés. Les effets possibles sur les personnes irradiées et sur leurs enfants et petits-enfants sont tous pris en considération.

La radioprotection vise donc la «protection des personnes, de leur descendance et de l'humanité en général» contre les dommages* qui pourraient découler d'irradiations indues aux rayonnements ionisants (3). L'un des objectifs fondamentaux est d'assurer que les irradiations aux sources de rayonnement artificielles sont maintenues à un faible niveau pour assurer à la société le meilleur avantage net* des applications industrielles, expérimentales et médicales des différentes sources de rayonnements ionisants.

Les principes peuvent être exprimés plus formellement en parlant de comparaison entre avantages et risques possibles, ainsi que d'équité entre personnes.

Un examen historique de la mise au point des concepts dans ce domaine figurent à l'annexe A. Le reste du document a pour but de fournir un aperçu plus détaillé des principes les plus importants en radioprotection au Canada, à l'heure actuelle, ce qui comprend une discussion plus poussée des niveaux «acceptables» de rayonnement et de la justification des pratiques qui entraînent une exposition aux rayonnements.

2. ORGANISMES INTERNATIONAUX

2.1 Aperçu général

La radioprotection au Canada fait partie de l'effort sociétal d'améliorer la santé et la prospérité générales, et est étroitement liée aux initiatives scientifiques et réglementaires au niveau international auxquelles tous les pays industrialisés participent. Les recommandations sont basées sur une grande quantité de données scientifiques rassemblées surtout depuis une quarantaine d'années. Ces recommandations et ces règlements ont évolué (annexe A) à mesure que de nouvelles données sur des questions critiques étaient disponibles. Les nouvelles recommandations doivent normalement être acceptées d'un commun accord par un groupe de spécialistes provenant de diverses disciplines scientifiques qui ont été réunis pour étudier les répercussions des nouvelles données, ainsi que les conclusions qui pourraient découler de ces données. Les scientifiques canadiens de différents organismes ont participé aux travaux des organismes internationaux de radioprotection.

Les organismes internationaux ont joué trois rôles importants en radioprotection :

(i) ORGANISATION DE CONFÉRENCES SCIENTIFIQUES auxquelles des scientifiques de différents pays assistent pour présenter de nouveaux renseignements sur la scène internationale. Depuis 1920, la *Société internationale de radiologie* organise des rencontres quadriennales sur les applications médicales des rayonnements. L'*Association internationale de radioprotection* a été créée en 1966 pour remplir un rôle similaire dans le domaine plus précis de la protection contre les effets biologiques nocifs des différentes sources de rayonnements ionisants ou non. La *Conférence internationale de la recherche sur les rayonnements* organise aussi, tous les quatre ans, des conférences scientifiques sur les aspects fondamentaux des interactions entre les rayonnements et les organismes vivants et les autres matières.

L'*Agence internationale de l'énergie atomique* (AIEA) a été établie, en 1957, grâce aux Nations Unies, par un traité signé par 82 États, afin de promouvoir l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire à l'échelle internationale. L'une des fonctions de l'AIEA est de commanditer de nombreuses conférences scientifiques sur différents sujets liés à l'utilisation pacifique des matières radioactives. Plusieurs de ces conférences sont parrainées conjointement par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et, dans certains cas, selon le sujet, par le Bureau international du travail. Les actes de toutes ces conférences sont publiées et sont disponibles auprès de l'organisme commanditaire.

(ii) EXAMEN CRITIQUE DES DONNÉES SCIENTIFIQUES PUBLIÉES sur l'intensité de rayonnements ionisants que les gens reçoivent et sur les effets biologiques des rayonnements sur les êtres humains. Dans ce domaine, le *Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements atomiques* (UNSCEAR, en anglais), établi en 1955 pour faire face à la grande inquiétude que causait la peur des retombées nucléaires dues aux essais d'armes nucléaires à cette époque, joue un rôle prédominant. Ce comité publie un document volumineux de quelque 300 à 400 pages tous les trois à cinq ans, où l'on retrouve les plus récentes données sur les irradiations d'une grande variété de sources naturelles et artificielles, de même que des données sur les effets biologiques des rayonnements.

Aux États-Unis, des examens parallèles sont menés par le *Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation* (BEIR) et le *National Council of Radiation Protection and Measurements* (NCRP). La composition de ces comités est surtout nationale, mais il leur arrive à l'occasion d'inviter des spécialistes canadiens et étrangers. Les conclusions générales de ces examens scientifiques se ressemblent la plupart du temps, fait qui ne devrait pas surprendre puisque les données scientifiques dont ils disposent sont les mêmes. Des études plus générales des effets des irradiations sur la santé, dus à différentes sources, sont aussi entreprises sporadiquement par plusieurs organismes, comme l'OMS, l'American Medical Association, le British Medical Council, le U.K. National Radiological Protection Board, la CCEA et d'autres organismes, qui s'occupent tous normalement des résultats des études scientifiques plus détaillées des comités UNSCEAR et BEIR.

(iii) RECOMMANDATIONS sur les limites de dose et principes pratiques pour limiter les irradiations des travailleurs et du public aux différentes sources de rayonnements ionisants. La *Commission internationale de protection radiologique* (CIPR) a joué un rôle clef dans l'établissement de recommandations. Ces recommandations n'ont aucune valeur légale et doivent être interprétées et traduites dans des documents législatifs par chacune des autorités nationales pertinentes, comme la CCEA dans le cas des installation nucléaires et des matières radioactives, ou par les autorités provinciales dans le cas des rayons X. Toutefois, les règlements de radioprotection au Canada sont, à quelques adaptations près dues aux exigences canadiennes, conformes aux recommandations de la CIRP. La CIPR et ses recommandations actuelles feront donc l'objet d'une discussion plus détaillée dans les sections qui suivent. D'autres recommandations, ordinairement semblables à celles de la CIPR, sont publiées par le *NCRP* aux États-Unis.

L'AIEA a également publié une série de documents sur les normes, les procédures et les recommandations de sécurité (par exemple, les normes de protection radiologique). En général, ces documents traitent de l'application des recommandations de la CIPR dans le domaine de l'énergie nucléaire. L'AIEA et l'OMS ont publié conjointement leurs recommandations sur les lignes directrices à suivre en cas d'urgences nucléaires. L'*Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)*, tout comme l'AIEA avec laquelle elle travaille étroitement, a été créée pour promouvoir le développement systématique des applications pacifiques de l'énergie nucléaire. L'AEN est composée de représentants de les pays de l'Europe occidentale, en plus de l'Australie, du Canada, des États-Unis, du Japon et de la Nouvelle-Zélande. Elle organise des ateliers sur différentes questions pratiques liées à l'énergie nucléaire et publie des lignes directrices et des recommandations dans ces domaines.

Tous les organismes mentionnés ci-dessus, ainsi que d'autres organismes nationaux, fournissent des renseignements utiles à l'évaluation quantitative des effets biologiques des rayonnements ionisants, aux recommandations sur les limites de dose et sur les méthodes pratiques pour maintenir les expositions au rayonnements sous le niveau des limites maximales.

2.2 Commission internationale de protection radiologique

La CIPR a été établie en 1928 et réorganisée en 1950, après quelques années d'inactivité durant et immédiatement après la Seconde Guerre mondiale. La Commission principale, formée d'un président et d'au plus 12 autres membres, se rapporte à la Société internationale de radiologie. La nomination des membres doivent être approuvée par le comité de direction de la Conférence internationale sur la radiologie qui a tenu un colloque scientifique de radiologistes médicaux tous les quatre ans depuis 1924 (sauf pendant et immédiatement après les années de guerre 1939 à 1945), sous les auspices de la Société internationale de radiologie.

Les membres de la CIPR sont «choisis d'après leur activité reconnue dans les domaines de la radiologie médicale, de la radioprotection, de la physique, de la protection radiologique, de la biologie, de la génétique, de la biochimie et de la biophysique» (3). Pour éviter que la Commission comprenne toujours les mêmes membres, tout en s'assurant une certaine continuité, pas moins de trois, mais pas plus de cinq membres, doivent céder leur place à chaque colloque de la Conférence internationale de radiologie. La CIPR a établi quatre comités pour traiter de sujets précis, soit les effets des rayonnements, les irradiations internes, les irradiations externes et l'application de ses recommandations. La plupart de ses travaux sont assurés par des groupes de travail *ad hoc* grâce auxquels la CIPR a pu faire appel aux services de nombreux spécialistes internationaux qui ne font pas partie de ses comités. Les participants canadiens aux travaux de la CIPR sont énumérés à l'annexe B.

Grâce aux subventions de divers organismes nationaux et internationaux intéressés, comme la CCEA et le ministère canadien de la Santé et du Bien-être social, la Commission a pu défrayer les frais de transport de certains participants aux réunions de ses comités et groupes de travail. Toutefois, la majeure partie de ses travaux dépend de l'appui volontaire des institutions particulières qui envoient des scientifiques à ces réunions (3). La CIPR s'occupe uniquement de la protection contre les irradiations indues aux rayonnements ionisants provenant de n'importe quelle source, y compris les rayons X, et non de la protection contre les rayonnements non ionisants.

La Commission travaille étroitement avec la Commission internationale des unités et mesures radiologiques (ICRU, en anglais) pour recommander des unités de dose de rayonnement. L'ICRU, tout comme la CIPR, a été créé par la Société internationale de radiologie et se rapporte à elle. Les deux commissions sont formées de scientifiques réputés de différentes nationalités et sont indépendants de leur gouvernement national.

3. RECOMMANDATIONS INTERNATIONALES

3.1 Justification des pratiques

La CIPR recommande comme premier principe du système de limitation des doses qu'«aucune pratique ne soit adoptée, à moins que son introduction produise un avantage net» (3). Ce principe, mieux connu comme «justification», a été appliqué de diverses façons au Canada et dans d'autres pays. Par exemple, l'utilisation aveugle des machines à rayons X pour ajuster les chaussures et l'utilisation de matières radioactives pour produire des jouets lumineux ont été interdites parce qu'elles présentaient peu ou pas d'avantage réel et plutôt un risque appréciable. L'utilisation des rayons X et des matières radioactives pour le diagnostic ou le traitement médical de diverses maladies est généralement considérée comme justifiée par l'avantage qu'elle représente pour la santé des malades, bien que les chercheurs médicaux contestent parfois certaines applications.

D'autres applications, comme la production d'électricité dans des centrales nucléaires, pourraient aussi être justifiées selon les seuls avantages pour la santé, puisque les effets nuisibles pour la santé liées à la production d'énergie requise par la société industrialisée sont de moindre importance que les avantages pour la santé dont profitent les membres de la société (13). Il faut cependant tenir compte de d'autres facteurs, comme l'économique, les futurs besoins d'énergie, la disponibilité actuelle et future des diverses sources d'énergie et des matières premières dans les divers pays.

La responsabilité de prendre des décisions dans ces domaines n'incombe pas seulement aux organismes de réglementation, mais aussi aux gouvernements fédéraux et provinciaux. Ces décisions doivent être prises dans le contexte de différents facteurs sociaux, y compris les effets des rayonnements sur la santé. La fonction des groupes de spécialistes, comme la CIPR (et au Canada, le Comité consultatif de la radioprotection) est de fournir des données et des recommandations dignes de foi au sujet des effets des rayonnements sur la santé pour que décisions bien documentées puissent être prises au sujet de la justification.

3.2 Optimisation de la radioprotection (principe ALARA)

La CIPR a également recommandé que «toutes les expositions soient maintenues au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux» (en anglais, "*as low as reasonably achievable*" [ALARA]) (3). Cette seconde recommandation est désignée comme l'«optimisation» de la radioprotection et est mieux connue sous le nom de «principe ALARA»*. Les recommandations de la CIPR ont toujours eu comme principe de maintenir les irradiations au niveau le plus faible possible, mais on insiste davantage sur l'optimisation depuis quelques années.

Le principe fondamental en optimisant la radioprotection est d'équilibrer le coût de la réduction des doses et les avantages possibles de cette réduction pour la santé. Des considérations sociétales s'y mêlent parce qu'il existe un niveau approprié de dépense en radioprotection au delà duquel la société pourrait récolter des avantages nets plus importants si les ressources étaient

investies dans d'autres domaines de sûreté ou d'amélioration de la santé ou investies pour augmenter la prospérité. L'optimisation maximise les avantages collectifs nets pour la société par suite d'une entreprise donnée qui fait appel aux rayonnements ionisants.

Une procédure recommandée pour décider ce qu'il est raisonnablement possible d'atteindre comprend une analyse coûts-avantages (3,14). D'autres méthodes de prise de décision comprenant plusieurs critères (14) peuvent inclure des jugements supplémentaires sur l'importance des facteurs comme la distribution des doses individuelles, l'esthétique, l'emploi et la peur du risque.

Diverses tentatives pour entreprendre des analyses coûts-avantages plus quantitatives ont entraîné l'attribution de valeurs monétaires aux avantages possibles sur la santé par suite de la réduction d'une unité de dose de rayonnement collective. Foncièrement, ceci vient à attribuer une valeur en dollars à la somme de travail raisonnable qu'une société doit consacrer pour réduire la probabilité statistique d'une mort prématurée ou de d'autres effets nuisibles sur la santé dus à toute cause connue ou probable. Bien qu'il existe toujours une certaine controverse quant à la meilleure valeur en dollars à utiliser dans ces analyses coûts-avantages, cette approche peut être utile pour *choisir une solution optimale parmi de nombreuses options de radioprotection proposées*. Les valeurs utilisées par la CIPR dans ses exemples numériques d'analyses coûts-avantages tournent autour des 10 $ américains (valeur de 1983) par personne-millisievert (14).

L'AIEA a recommandé 3 $ par millisievert comme minimum international pertinent, suggérant également que des valeurs supérieures soient considérées comme plus appropriées aux pays mieux nantis (24). La valeur choisie devrait s'appliquer également aux personnes vivant dans tel ou tel pays et à toutes les personnes du monde entier qui pourraient être touchées par les rejets radioactifs du pays visé (24).

3.3 Limites de dose individuelle

Pour limiter le risque pour la santé de chaque travailleur sous rayonnements pour que le risque soit comparable à celui de chaque travailleur dans d'autres secteur industriels, la CIPR a recommandé des doses maximales admissibles pour chaque personne (3) au-dessus du fond naturel de rayonnement et des applications médicales des rayonnements. Ces doses maximales sont de 50 mSv par année pour les travailleurs sous rayonnements et de 5 mSv par année pour tout membre du public. Une limite principale de 1 mSv par année répartie sur toute la vie, c'est-à-dire environ 75 ans en moyenne, a été recommandée pour les membres du public (3,15) afin de réduire la probabilité maximale de dommages à environ 1 sur 10^5 par année. Des restrictions spéciales sont recommandées dans le cas des travailleuses sous rayonnements enceintes afin de protéger l'enfant *in utero*. La protection de la population en général contre les produits de filiation du radon représente une question distincte qui n'a toujours pas été résolue. Les limites réglementaires canadiennes sont actuellement équivalentes à environ 10 à 14 mSv par année pour les membres du public.

Les limites de dose recommandées visent les irradiations que reçoivent les travailleurs sous rayonnements au travail, peu importe que ce soit en médecine, en exploitation minière, dans les installations nucléaires ou dans d'autres industries. Les limites de dose pour les membres du public ne s'appliquent pas aux irradiations dues aux sources naturelles ou aux irradiations des malades dans le cadre d'un diagnostic ou d'un traitement. Les irradiations des malades devraient être maintenues au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre et qui ne compromettrait pas les avantages médicaux pour le malade (3).

Grâce aux calculs estimatifs quantitatifs du risque de la CIPR (3), la somme des risques possibles de cas de cancer fatal dus aux rayonnements chez les travailleurs irradiés (soit $1,3 \times 10^{-5}$ par millisievert) et de tares génétiques dues aux rayonnements chez les enfants et les petits-enfants des travailleurs irradiés (soit $0,m \times 10^{-5}$ par millisievert) serait équivalente à un risque annuel de 8 par 10 000 travailleurs à la limite maximale admissible de 50 mSv par année pour les travailleurs sous rayonnements. Il reste toutefois que les expositions moyennes de plusieurs grandes catégories de travailleurs assujettis à la limite de 50 mSv tournaient généralement autour de 5 mSv par année (3). Le risque possible dû aux rayonnements à cette intensité d'irradiation moyenne se situe autour d'une mort au travail par 10 000 travailleurs par année, c'est-à-dire un niveau de risque que les secteurs industriels considérés comme «sûrs» atteignent déjà (tableau 3). Le risque de mortalité au travail durant une période de travail de 50 ans dans un secteur industriel où le taux de mortalité au travail est d'un travailleur par 10 000 travailleurs par année est actuellement environ 40 fois inférieur au risque de mortalité due à toute autre cause entre l'âge de 18 et de 65 ans. La CIPR a recommandé que l'irradiation prolongée d'une large proportion des travailleurs à la limite ou voisine de la limite de 50 mSv par année «ne serait acceptable que si une analyse coûts-avantages approfondie montrait que le risque plus élevé qui en résulte était justifié» (3).

Dans le cas d'irradiations de parties du corps, un système de limites basé sur l'«équivalent de dose effectif»* est recommandé (3). Les tissus du corps ne reçoivent pas tous la même dose lorsqu'une personne est irradiée par des rayons dits «mous», c'est-à-dire de faible énergie, comme les rayons X, le rayonnement bêta ou les neutrons rapides provenant de sources externes, ou encore par des produits de filiation du radon respirés ou par de nombreux autres radionucléides respirés ou avalés. Pour tenir compte de la distribution non uniforme des doses, on attribue à chaque tissu un facteur de pondération qui traduit la probabilité de cas de cancer fatal ou de tare génétique (chez les enfants et les petits-enfants des personnes irradiées) à cause de l'irradiation de cet tissu (3). La somme des facteurs de pondération de tous les tissus du corps est de 1. Le terme «équivalent de dose effectif» désigne la somme des doses de chaque tissu, chaque dose étant exprimée en millisieverts et multipliée par le facteur de pondération pertinent. Le risque total de cas de cancer fatal et de tares génétiques par suite d'un équivalent de dose effectif de 1 mSv devrait donc être identique à celui qu'entraînerait une dose de 1 mSv au corps entier.

Une limite prépondérante de 500 mSv par année pour n'importe quel tissu particulier (ou de 150 mSv par année dans le cas du cristallin qui est plus sensible) s'applique pour prévenir tout effet non stochastique dû à l'irradiation des travailleurs sous rayonnements au travail (3). La limite non stochastique est

dix fois inférieure pour les membres du public pour tenir compte du fait qu'ils peuvent être irradiés tout au long de leur vie plutôt que pendant leur années de travail uniquement, qu'ils comprennent des personnes possiblement plus sensibles aux rayonnements que la moyenne et que leurs irradiations ne sont pas contrôlées directement comme les travailleurs sous rayonnements.

Tableau 3

Taux de mortalité au travail chez les travailleurs indemnisables au Canada de 1976 à 1980 [a]

Secteur industriel	Pourcentage de tous les travailleurs indemnisables	Mortalité au travail par 10 000 travailleurs par année
Finances	5,6	0,16
Services	29,8	0,25
Commerce	17,1	0,45
Agriculture [b]	1,6	0,84
Administration publique	7,3	0,91
Fabrication	21,2	0,93
Transport	9,4	2,45
Construction	5,3	3,7
Exploitation minière	1,7	9,4
Exploitation forestière	0,8	11,7
Pêche	0,1	20,0

[a] Le tableau tient compte des décès dus à des maladies professionnelles ou à une blessure antérieure invalidante. Il ne comprend pas les décès parmi les 20 pour 100 de tous les travailleurs au Canada qui n'étaient pas couverts par les dispositions d'indemnisation de travail. Ces connées ont été compilées par la Direction de la santé et de la sécurité au travail du ministère fédéral du Travail du Canada.

[b] Les données sur les travailleurs agricoles ne se comparent directement avec celles des autres pays, comme les États-Unis ou le Royaume-Uni, à cause des différences entre les catégories de travailleurs comprises dans la compilation.

4. APPLICATIONS DES PRINCIPES DE RADIOPROTECTION DANS CERTAINS DOMAINES

Les limites de 50 mSv par année pour chaque travailleur sous rayonnements et de 5 mSv par année pour chaque membre du public sont généralement acceptées au Canada et dans la plupart des autres pays comme base de réglementation et ne feront pas l'objet de discussions plus approfondies. Les domaines précis de radioprotection auxquels des comités scientifiques consultatifs canadiens ont prêté beaucoup d'attention sont notés plus bas.

4.1 Principe ALARA

Les doses de rayonnement reçues par la plupart des catégories de travailleurs sous rayonnements au Canada ont été en moyenne bien en deçà des limites réglementaires (17). La plupart des groupes de travailleurs utilisant les rayons X ou des matières radioactives reçoivent des doses annuelles moyennes plus de dix fois inférieures à la limite de dose annuelle actuelle. Les groupes les plus exposés dans les réacteurs nucléaires, par exemple, les opérateurs de réacteurs et les employés responsables de l'entretien mécanique, reçoivent en moyenne une dose quatre fois inférieure à la limite. Les irradiations du grand public habitant aux environs des centrales nucléaires ont rarement dépassé 0,05 mSv par année, soit le centième de la limite maximale de 5 mSv recommandée par la CIPR pour chaque membre du public. Les problèmes antérieurs dus aux doses de rayonnement élevées des travailleurs dans les mines d'uranium souterraines (18) ont diminué, mais continuent de faire l'objet de discussions et de recherches.

En dépit de la réalisation de faibles doses professionnelles dans plusieurs domaines de la radioprotection, on suppose qu'il subsiste toujours un certain niveau de risque. Le projet de règlement de la CCEA (19) sur l'utilisation de matières radioactives et l'exploitation d'installations nucléaires au Canada comprend une exigence obligeant tout titulaire de permis* à «préparer et appliquer ... des mesures pour maintenir les doses de rayonnement que reçoit toute personne ou tout groupe de personnes au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux pertinents». Le but visé est d'assurer un équilibre entre l'opportunité de réduire davantage les doses de rayonnement et l'augmentation correspondante des coûts (20). La diminution des doses individuelles ne représente pas l'unique but; plus importante encore est la diminution de la dose collective*, c'est-à-dire les doses individuelles moyennes multipliées par le nombre total de personnes irradiées (voir paragraphe 4.2), due à une pratique donnée. La dose collective moyenne par unité de puissance produite est déjà plus de dix fois inférieure dans les centrales nucléaires canadiennes les plus récentes (21). Un processus ALARA pratique doit généralement tenir compte du rendement passé dans tout contexte donné.

Le processus ALARA ne devrait s'appliquer qu'au choix entre diverses méthodes de protection pour la même pratique (22,23). Si une pratique se justifie parce qu'elle procure plus d'avantages que de désavantages à la société, ce serait mal appliquer le principe ALARA que d'essayer de limiter la portée totale de cette pratique pour réduire la dose collective (23). Par exemple, on considère généralement que les gens des régions moins favorisées du globe tireraient avantage d'un nombre accru plutôt que réduit de diagnostics radiologiques. Le processus ALARA a été appliqué plus correctement aux efforts entrepris pour minimiser les doses des malades, dues aux diagnostics radiologiques, sans rien perdre des avantages de diagnostics médicaux appropriés pour la santé.

Les analyses coûts-avantages ont été appliquées aux mesures de contrôle possibles des concentrations naturelles des produits de filiation du radon dans les habitations à travers le Canada (25), ainsi que des sources de rayonnement artificielles. Le CCRP a suggéré, en outre, que le processus ALARA soit étendu non pas seulement aux risques radiologiques, mais à tous les risques au travail.

Cette recommandation est d'autant plus pertinente dans les secteurs industriels, comme dans les mines d'uranium souterraines, où la fréquence et la gravité des accidents au travail sont relativement élevées.

4.2 Engagement de dose collectif

«Dose collective» désigne la somme des doses individuelles de toutes les personnes irradiées, exprimée en personnes-sieverts. Par exemple, il y a actuellement 25 millions d'habitants au Canada qui sont exposés chaque année à environ 2 mSv à cause de sources naturelles (tableau 1). La dose collective annuelle de la population canadienne, due aux sources naturelles, est donc d'environ 50 000 000 personnes-millisieverts ou 50 000 personnes-sieverts.

Dans le cas des activités humaines comprenant la production de matières radioactives* à longue période*, il faut examiner les effets futurs possibles des rayonnements en cause sur la santé. Cet examen est particulièrement important en gestion des déchets radioactifs. Le terme «engagement de dose collectif» est utilisé pour désigner la dose de rayonnement collective de toutes les personnes en tout lieu et en tout temps. Des concepts quantitatifs similaires n'ont toujours pas été mis au point pour la gestion des déchets non radioactifs, mais possiblement nocifs.

Si la relation dose-réponse sans seuil est exacte, il faut procéder obligatoirement à une sommation temporelle et spatiale pour équilibrer l'unité donnée d'avantage pour la société et le dommage collectif associé à la production de cette unité d'avantage. Vu l'état actuel des connaissances, il est impossible de faire la somme des avantages collectifs de toute pratique donnée pour l'humanité, en tout temps et tout lieu. Il est aussi impossible de fournir des estimations scientifiques précises du dommage collectif de toute pratique donnée pour l'humanité, en tout temps et en tout lieu. Pour ces raisons, il semble pratique et réaliste d'établir des seuils appropriés pour calculer les doses collectives.

Un seuil ou une limite d'intégration dans la somme des doses étalées dans l'espace est généralement considérée comme acceptable, pourvu que la distance du seuil soit suffisante pour assurer que la somme véritable des doses de la population totale n'est pas grossièrement sous-estimée. Par exemple, la somme des doses dues à des rejets aériens de radionucléides* à période courte, comme le radon 222 dont la période est de 3,8 jours, sur tout le territoire canadien et le territoire continental des États-Unis ne sous-estimeraient pas sérieusement la dose collective de toute la population du monde. Toutefois, la même procédure pourrait sous-estimer les doses globales par un facteur important dans le cas des rejets de radionucléides à période longue en suspension dans l'air, comme le carbone 14, dont la période est de 5730 ans. Dans ce dernier cas, la dose collective devrait être établie en tenant compte plutôt de la population entière du globe.

Le choix du seuil pour les sommes correspondantes de doses étalées dans le temps représente un problème plus épineux, surtout pour les nucléides à très longue période. Partout à travers le monde, on se méfie en général de l'importance pratique de résultats établis à partir de calculs théoriques d'engagements de doses et d'engagements de risques qui portent sur des situations de plus en plus imprévisibles dans des millions d'années futures. Diverses options ont été proposées.

a) D'aucuns favorisent seulement une somme à court terme, comme une période d'une centaine d'années, par exemple, pour représenter l'avenir prévisible (20). Ceci est fondé sur la supposition que la génération actuelle devrait assumer la principale responsabilité de sa propre sécurité et celle de ses enfants et petits-enfants. L'amélioration de la santé publique et des capacités techniques de notre société depuis 100 ans ont été si notables qu'il est difficile de prévoir ce à quoi la société ressemblera dans un siècle.

b) Certains (26) favorisent une somme à moyen terme, comme une période de 10 000 ans, ce qui équivaut environ à l'histoire connue ou documentée de l'humanité, si l'on inclut les dessins des cavernes. Une période de 10 000 années pourrait aussi être considérée comme l'intervalle approximatif entre les glaciations au Canada.

c) D'autres, enfin, préconisent d'escompter les calculs estimatifs des composants de l'engagement de dose et de l'engagement de risque de l'avenir plus éloigné. Il n'existe aucun accord général la méthode de faire l'escompte (22).

L'importance de l'optimisation de la radioprotection serait réduite si l'on ne tentait pas d'estimer l'engagement de dose collectif possible, totalisé en tout temps et en tout lieu, qui pourrait découler de la production d'une unité donnée d'avantage collectif. Ce calcul estimatif peut être utile, par exemple, pour essayer de décider quelle option disponible pourrait logiquement être choisie pour la gestion des déchets radioactifs à période longue. Toutefois, la valeur pratique de cette somme pourrait être invalidé si l'on accordait trop de poids aux contributions de dose très incertaines dans l'avenir éloigné (24). Les prévisions touchant aux dizaines, aux centaines, voire aux milliers d'années à venir peuvent servir de guides utiles pour examiner les conséquences des mesures actuelles, mais les prévisions touchant aux centaines de milliers ou aux millions d'années à venir sont généralement considérées comme très peu pertinentes du point de vue pratique (2).

4.3 Concept «*de minimis*»

Toutes les matières qui existent, y compris les tissus du corps humain, contiennent de petites quantités de radionucléides. Comme les règles de radioprotection visent à assurer un haut niveau de sûreté, plutôt que de réglementer ou d'interdire toutes les activités humaines, il est sensé de croire que, par tradition, la possession de petites quantités de matières radioactives n'a jamais causé d'inquiétude et qu'elle devrait par conséquent échapper à la réglementation. Il n'existe pourtant aucune base cohérente d'exemptions antérieures de permis. Étant donné cet état de choses et pour d'autres raisons pratiques, l'application du concept *de minimis* est à l'étude actuellement (27). En principe, une dose *de minimis* représente une dose par rapport à laquelle le risque à la santé est si faible que tout effort entrepris pour en réglementer la source pourrait être considéré comme une dépense indue de ressources sociétales en vue d'un avantage infime pour la protection de la santé (27).

Le débit de dose *de minimis* (27) de 50 microsieverts* (50 µSv ou 0,05 mSv) par année proposé par la CCEA pour les membres du public correspond au quarantième des irradiations annuelles moyennes dues aux sources naturelles. La CIPR a suggéré de même des règles d'exemption pour les débits de dose individuels variant entre 0,01 et 0,1 mSv environ par année, selon le nombre de sources exemptées auxquelles la même personne pourrait avoir été exposée (28). En deça de ce critère, il n'y aurait aucun besoin d'assurer la protection radiologique des personnes (28).

La dose collective due à la dispersion de radionucléides à période longue dans la biosphère pourrait être considérée comme trop importante pour être négligeable du point de vue sociétal, même si les débits de dose aux personnes sont très faibles. Pour cette raison, il faudrait aussi examiner les débits de dose collectifs *de minimis* (27). Ainsi, toute source donnée pourrait ne pas être considérée comme *de minimis* à moins de satisfaire à la fois le critère de débit de dose individuel et le critère de débit de dose collectif.

D'autres facteurs à considérer en établissant les valeurs *de minimis* des débits de dose collectifs comprennent la possibilité d'un grand nombre d'activités dans plusieurs pays du monde, entraînant chacune un débit de dose *de minimis* à la population canadienne. Plus encore, les doses dues aux rejets continus de radionucléides à période longue, comme le carbone 14, seraient cumulatives. C'est pourquoi des dossiers devraient être conservés à propos des diverses contributions à la dose de rayonnement collective de la population canadienne et des prévisions de modèles à long terme devraient être mis au point par les autorités appropriées (3). Jusqu'à maintenant, ce sont les rapports du Comité scientifique des Nations Unies qui ont représenté la meilleure source de renseignements de ce genre (2). L'examen périodique du concept *de minimis* et des critères d'exemption des sources par les autorités nationales compétentes serait utile.

L'un des principaux objectifs de la radioprotection est d'assurer que le risque collectif à la société, dû à toute activité donnée ayant recours à des sources de rayonnement, sera aussi faible que possible par rapport à son avantage collectif. Si une dose collective peut être réduite à peu de frais et de façon rentable, il faudrait le faire peu importe que la dose dépasse le critère *de minimis*.

4.4 Quantités réglementaires

La CCEA utilise le concept de «quantité réglementaire» de plusieurs façons dans son régime de permis lié à l'utilisation de matières radioactives au Canada. Les critères de quantités réglementaires sont : a) que la possession et l'usage illimité de 1 quantité réglementaire n'entraînerait pas de dose annuelle à toute personne, due aux rayonnements externes, supérieure à 5 mSv pour le corps entier, 50 mSv pour la peau du corps entier, ou à 500 mSv pour des parties limitées de la peau qui sont inférieures à environ 2 ou 3 pour 100 de la superficie totale du corps; b) que l'ingestion ou la respiration de 1 quantité réglementaire n'entraînerait pas de dose engagée* totale supérieure à 5 mSv (29). Divers scénarios d'irradiation sont à l'étude pour calculer la quantité de tout radionucléide donné qui représente 1 quantité réglementaire (29).

Les quantités réglementaires de 102 radionucléides sont indiquées dans le projet de modification du Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique (19). Pour les radionucléides non énumérés, la quantité réglementaire est de 10^4 becquerels si le numéro atomique* du nucléide est égal ou inférieur à 81, et de 10 becquerels si le numéro atomique est supérieur à 81.

Les activités sont exemptées de permis de la CCEA si la concentration de substances radioactives est inférieure à 1 quantité réglementaire par kilogramme ou encore si la source ne contient pas plus de 1 quantité réglementaire et que le titulaire de permis éventuel n'a pas besoin de plus de 10 quantités réglementaires par année (19). La complexité des programmes de radioprotection exigés comme condition de permis de radio-isotopes délivré par la CCEA est déterminée par le nombre de quantités réglementaires en cause.

Le concept de quantité réglementaire joue ainsi un rôle important en radioprotection au Canada. Pour placer certains des nombres proposés en perspective, il faudrait peut-être noter que les concentrations moyennes de potassium 40, d'uranium 238 et de thorium 232 dans le sol (2) correspond respectivement à environ 0,04, 0,1 et 2,6 quantités réglementaires par kilogramme.

Il n'existe pas actuellement de relation directe entre les quantités réglementaires proposées et les débits de dose *de minimis* dus aux sources artificielles de rayonnement; une relation de ce type serait utile si l'on tient compte des voies d'acheminement radiologiques pertinentes et des autres facteurs en cause.

4.5 Risque professionnel en exploitation minière de l'uranium

L'exploitation minière, en général, est une occupation relativement dangereuse à cause du taux élevé d'accidents au travail (tableau 3) et l'exploitation minière de l'uranium n'y échappe pas. Les mineurs d'uranium sont en outre exposés aux dangers radiologiques au travail, notamment en respirant les produits de filiation du radon. Dans certaines mines d'uranium, les maladies dues aux poussières comme la silicose représentent également un danger. En principe, les travailleurs devraient être protégés de tous les risques radiologiques ou non au travail de la façon la plus rentable. Il est donc tout indiqué de tenir compte des risques radiologiques et non radiologiques en appliquant la recommandation de maintenir les risques au travail des mineurs d'uranium au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (30).

La CIPR a recommandé en 1959 (30) que 4 WLM* de produits de filiation du radon respirés représente un risque pour la santé équivalant à la dose maximale admissible de 50 mSv par année pour le corps entier des travailleurs sous rayonnements. Cette limite recommandée pourrait être comparée avec des expositions estimées de 20 à 2000 WLM par année pour les travailleurs à plein temps de certaines des premières mines d'uranium canadiennes dans les années 40 et 50 (18,32).

Le système d'«équivalent de dose effectif» (voir paragraphe 3.3) pour estimer le risque pour la santé, de l'irradiation partielle du corps due à des radionucléides internes, comme les produits de filiation du radon respirés, a été établie en 1977 (3) et est généralement accepté par la plupart des pays. Les expositions maximales admissibles devaient être limitées selon la somme des

expositions à toutes les sources de rayonnement au travail (3). Dans le cas des mineurs d'uranium, ceci veut dire que, au lieu de limiter seulement les produits de filiation du radon, la somme des équivalents de dose effectifs dus aux rayons gamma externes, aux produits de filiation du radon respirés, aux produits de filiation du thoron et aux poussières de minerai contenant des radionucléides à longue période devrait être limitée de façon à ne pas dépasser un équivalent de dose effectif total de 50 mSv par année. Les limites annuelles d'incorporation de produits de filiation du radon et du thoron, ainsi que des radionucléides à période longue, qui pourraient être présents dans les poussières de minerai ont été calculées (12,33). Dans le cas des produits de filiation du radon, la limite annuelle équivaudrait à 4,8 WLM par année (12). L'effet net de ces recommandations est beaucoup plus restrictif pour limiter les expositions aux rayonnements dans les mines d'uranium canadiennes que l'application du règlement canadien de 1978 (34).

L'AIEA et la CIPR ont toutes deux noté les considérations pratiques pour réduire les dangers radiologiques des mineurs d'uranium (33). Les spécialistes de divers pays continuent d'évaluer le risque de cancer du poumon dû à la respiration de produits de filiation du radon et l'exactitude des calculs continue de s'améliorer à mesure que des données plus détaillées sont disponibles. Selon des données épidémiologiques seules, il semble que le risque radiologique moyen de 4 WLM de produits de filiation du radon respirés soit un eu plus élevé que celui qui est attribué à une dose de 50 mSv au corps entier (35). Des valeurs semblables pour le risque dû à l'exposition aux produits de filiation du radon peuvent être dérivées du réexamen récent de données épidémiologiques par la CIPR (36). Tous ces calculs estimatifs du risque sont sujets à divers niveaux d'incertitude. Malgré certaines de ces incertitudes, la meilleure approche de la protection des mineurs d'uranium au travail est de continuer à insister sur le principe ALARA afin de réduire le risque radiologique, et sur la diminution des autres risques non radiologiques connexes de l'exploitation minière.

4.6 Travailleuses sous rayonnements

La possibilité de dommages au foetus, notamment le développement défectueux du système nerveux central, à cause de l'irradiation des femmes enceintes a été reconnue dès 1945 dans le Projet canadien d'énergie atomique (31). La réglementation canadienne interdit l'emploi de femmes enceintes comme travailleuses sous rayonnements au Canada depuis 1960. En 1964, la CIPR a recommandé une dose maximale admissible de 13 mSv par trimestre, sans dépasser 50 mSv par année, pour les femmes en état de reproduire, et une dose maximale de 10 mSv au foetus tout au long du reste de la grossesse après qu'elle a été diagnostiquée, supposant que le diagnostic a eu lieu moins de deux mois après la conception. La recommandation avait pour but d'assurer que les doses totales de rayonnement à l'enfant en développement ne dépasserait pas 20 mSv. Les recommandations plus récentes de la CIPR sur le sujet sont foncièrement restées les mêmes (3). Le but de ces recommandations est de minimiser la possibilité de dommage dû aux rayonnements à l'enfant *in utero*. La probabilité de cas de cancer et de tares génétiques dus aux rayonnements par unité de dose ne diffère pas beaucoup entre l'enfant *in utero* et les travailleurs et travailleuses sous rayonnements.

Les recommandations de la CIPR ont été interprétées au Canada pour signifier que le débit de dose maximal admissible pour les travailleuses sous rayonnements enceintes ou non ne devraient pas dépasser 2 mSv par période de deux semaines. Pour assurer que cette limite légale ne soit pas dépassée, le débit de dose maximal a souvent été limité en pratique à 1 mSv par période de deux semaines au Canada (37).

Après consultation avec des groupes médicaux et scientifiques consultatifs, le règlement canadien a été modifié en 1985 (38) pour éliminer toute discrimination entre travailleurs et travailleuses sous rayonnements jusqu'à ce que la travailleuse sous rayonnements avise son employeur qu'elle est enceinte. La responsabilité d'aviser l'employeur d'une grossesse incombe à la femme enceinte visée. À cette étape, l'employeur doit s'assurer que la travailleuse enceinte est affectée à des travaux où la dose de rayonnement totale au travail reçue par le foetus durant le reste de la grossesse ne dépasse pas 10 mSv. Cette réglementation (37) prévoit une dose maximale admissible de 30 mSv par trimestre, sans dépasser 50 mSv par année, autant pour les travailleurs que pour les travailleuses sous rayonnement, pourvu que la travailleuse sous rayonnements ignore qu'elle est enceinte. Le règlement canadien actuel régissant l'emploi de travailleuses sous rayonnement est donc moins restrictive en quelque sorte que les recommandations de la CIPR (3) ou celles du comité national américain équivalent (38). Toutefois, la possibilité est infiniment faible en général que la recommandation de la CIPR de maintenir les doses de rayonnement totales de l'enfant en développement inférieures à 20 mSv durant la grossesse de la mère ne serait pas observée en vertu de la réglementation canadienne actuelle (38).

Des calculs estimatifs quantitatifs du risque de déficience mentale grave par suite de l'irradiation de l'enfant en développement sont disponibles depuis 1969 (39). La récente réanalyse des données a abouti à un certain affinage, mais n'a rien changé de fondamental aux calculs initiaux (40). Les données actuelles indiquent un risque presque nul de déficience mentale grave par suite de toute irradiation au cours des sept premières semaines de grossesse (c'est-à-dire les neuf premières semaines après les dernières menstruations), un risque de 4 par 10 000 par millisievert entre la huitième et la quinzième semaine de grossesse, et un risque moyen de déficience mentale grave de 1 par 10 000 par millisievert, réparti sur toute la durée de la grossesse. Ces risques sont élevés par rapport au risque de cancer fatal, soit environ 0,15 par 10 000 par millisievert, chez les travailleuses sous rayonnements, par exemple. Entre outre, il pourrait y avoir un risque de cancer fatal chez les enfants irradiés *in utero*, d'environ 0,2 par 10 000 par millisievert (2). D'autres risques moins importants pour la santé, comme la perte d'une cellule d'oeuf fertilisé avant la nidation et le développement dans l'utérus, ont aussi été mentionnés (2,6). Toutefois, le risque radiologique possible durant les premiers stades de la grossesse, c'est-à-dire les neuf premières semaines après les dernières menstruations, semblent suffisamment faibles pour justifier la réglementation canadienne actuelle non discriminatoire sur l'emploi de travailleuses sous rayonnements qui ne sont pas enceintes (42).

Il reste, cependant, que tous les travailleurs sous rayonnements, peu importe qu'ils soient des hommes ou des femmes, devraient être informés des détails sur le risque radiologique possible que comporte leur travail, pour qu'ils en comprennent l'importance avant de décider de continuer ou non à travailler comme travailleurs sous rayonnements. Ces détails comprennent le risque dû à l'irradiation de l'enfant *in utero* durant la grossesse.

5. APPLICATION DES PRINCIPES DE RADIOPROTECTION

La radioprotection dépend des attitudes, ainsi que des règles et des règlements officiels. Les autorités réglementantes, les employeurs et les employés assument tous une part de la responsabilité en la matière. La conformité aux règles et aux règlements est importante, mais la motivation et les habitudes de travail sont tout aussi importantes, parce qu'elles touchent tous les niveaux de personnes qui s'occupent de protéger autrui tout en se protégeant eux-mêmes contre toute irradiation indue.

5.1 Rôle de la Commission de contrôle de l'énergie atomique

La Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) joue un rôle clef dans la réglementation des installations nucléaires et des utilisations de matières radioactives au Canada. Ces activités comprennent tous les aspects de l'exploitation minière et de la concentration de l'uranium, le raffinage des minerais radioactifs, la fabrication de combustibles de réacteur nucléaire, l'exploitation des réacteurs, la production de matières radioactives dans les réacteurs nucléaires ou dans les accélérateurs à haute énergie, l'utilisation des matières radioactives à des fins médicales, expérimentales ou industrielles, le transport des matières radioactives, ainsi que la gestion et l'évacuation des déchets radioactifs.

Les principales responsabilités de la CCEA sont d'établir des règlements en vertu de la Loi sur le contrôle de l'énergie atomique et de les soumettre à l'examen et à l'approbation du gouvernement fédéral; de délivrer, après examen très attentif des activités proposées, à des personnes ou à des organismes des permis les autorisant à exploiter des installations nucléaires ou à utiliser des matières radioactives; d'évaluer diverses pratiques de radioprotection, et d'inspecter l'exploitation des installations autorisées pour assurer que les conditions du permis sont respectées.

Pour mieux assumer ses responsabilités, la CCEA, d'une part, dépense actuellement environ 3 millions de dollars par année en recherche sur des questions cruciales en radioprotection, en sûreté des réacteurs et en garanties, et, d'autre part, a créé le Comité consultatif de la radioprotection et le Comité consultatif de la sûreté nucléaire pour lui fournir des conseils scientifiques indépendants sur des sujets pertinents en radioprotection et en sûreté nucléaire.

La CCEA publie aussi des documents de consultation afin d'obtenir les commentaires du public avant de modifier légalement les règlements. Le ministère fédéral de l'Environnement exige des auteurs de demandes de permis de construction de nouvelles installations nucléaires de présenter les renseignements appropriés à des rencontres publiques que la CCEA surveillent également. Une étroite collaboration avec les autorités provinciales et les autres organismes fédéraux et internationaux est capitale pour permettre à la CCEA d'assumer ses responsabilités.

5.2 Rôle du ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social

Le Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux de la Direction de la protection de la santé du ministère de la Santé et du Bien-être social s'occupe de tous les aspects de la protection contre les rayonnements ionisants

ou non, peu importe qu'ils proviennent de matières radioactives, des machines de radiographie (rayons X) ou de toute autre source. Le Bureau agit comme l'un des principaux conseillers de la CCEA en matière d'hygiène et travaille étroitement avec les organismes provinciaux de radioprotection. Ses activités visent deux buts principaux : a) aider à assurer la santé et la sécurité des travailleurs sous rayonnements canadiens, et b) évaluer et faire des recommandations au sujet de l'irradiation des membres du public.

Depuis 1950, le Bureau contrôle aussi le niveau de matières radioactives dans les aliments, l'eau potable et l'air dans différents endroits au Canada, sans compter l'intensité du fond naturel de rayonnement dans plusieurs villes canadiennes.

Le Bureau comporte, par ailleurs, un service de dosimétrie pour les irradiations externes des travailleurs sous rayonnements au Canada, comme les mineurs d'uranium, les opérateurs de machines de radiographie (rayons X) et les utilisateurs de d'autres sources de rayonnements ionisants. Il assiste à l'enquête sur les doses enregistrées qui dépassent les limites maximales admissibles d'après la loi. Le Fichier dosimétrique national (43) a été établi pour maintenir un dossier permanent de toutes les expositions professionnelles au Canada. Ce dossier, lisible par machine, est pratiquement complet pour la plupart des expositions professionnelles actuelles et contient la plupart des données des dossiers antérieurs remontant jusqu'aux années cinquante. Des renseignements statistiques pris de ce dossier sont fournis à la CCEA et à d'autres organismes responsables, sur demande. Des anthroporadiamètres et des techniques de biodosage assurent le contrôle des radionucléides internes.

Le Bureau met aussi à l'épreuve les nouvelles machines de radiographie et d'autres dispositifs, à mesure qu'ils apparaissent sur le marché, pour assurer qu'ils sont conformes aux normes de sûreté. Vu les inquiétudes récentes au sujet des effets des produits de filiation du radon à période courte sur la santé du public, une vaste enquête sur l'intensité des produits de filiation du radon dans les foyers canadiens a été menée (44). Les résultats obtenus représentent une référence capitale pour déterminer les niveaux possibles où il faudrait peut-être intervenir (25).

Le Bureau collabore avec d'autres organismes et d'autres divisions du ministère de la Santé et du Bien-être social pour établir les lignes directrices fédérales des concentrations maximales admissibles de matières radioactives dans l'eau potable du public (45).

En dernier lieu, le Bureau joue un rôle de premier plan dans le Plan d'urgence nucléaire du gouvernement fédéral. Bien que la juridiction et la responsabilité des plans d'urgence hors site par rapport à une urgence nucléaire dans une province donnée relèvent du gouvernement provincial visé (46), le Centre d'urgence nucléaire du Bureau est responsable de la liaison entre les divers ministères et organismes fédéraux, les provinces et les États-Unis, pour coordonner les activités fédérales et pour aider les provinces, sur demande.

5.3 Rôle des provinces

Les provinces sont responsables des règlements concernant autant les irradiations au travail dues aux rayons X que les irradiations dues aux autres sources de rayonnements ionisants. Bien que la législation varie à l'occasion entre

les provinces, les exigences réglementaires se conforment, en général, aux recommandations de la CIPR (3), du ministère de la Santé et du Bien-être social et des restrictions réglementaires de la CCEA.

Une initiative provinciale intéressante a été l'application précoce de principe que des expositions maximales admissibles aux mineurs d'uranium en Saskatchewan devraient être limitées par la somme de leur exposition aux produits de filiation du radon et aux rayonnements gamma externes, comme le recommande la CIPR (3). La Saskatchewan est, comme d'autres provinces, responsable de la législation sur la santé et la sécurité générales des travailleurs.

La législation provinciale régit la réhabilitation et l'indemnisation des travailleurs qui ont souffert de blessures ou de maladies qui pourraient être attribuées à leur travail. Certains des premiers mineurs d'uranium de l'Ontario ou de spath fluor de Terre-Neuve ont reçu des indemnisations de travail parce qu'ils avaient un cancer qui aurait pu être causé par des irradiations au travail dues aux produits de filiation du radon, à un moment où l'on ne connaissait pas pleinement l'importance de ce danger. L'Ontario, de concert avec la CCEA, continue d'étudier la santé des mineurs de l'Ontario, y compris les mineurs d'uranium.

Plusieurs provinces appliquent leur propre programme de contrôle de l'intensité de rayonnement dans l'environnement, en collaboration avec le ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social, assurant ainsi que la santé de leur population respective n'est pas compromise par une tel risque. La planification d'urgence en cas d'accidents nucléaires graves, comme pour toute autre sorte de situation d'urgence, est également de juridiction provinciale.

5.4 Responsabilités des titulaires de permis

La responsabilité fondamentale des titulaires de permis est d'assurer aux travailleurs la sécurité au travail et une installation dont le risque pour la population environnante ne sera qu'infime. Pour atteindre ces objectifs, les titulaires de permis doivent s'assurer que toutes les exigences réglementaires du permis fédéral ou provincial sont respectées. C'est là un point capital pour eux à observer, sinon leur permis pourrait être abrogé ou leur être enlevé.

Plusieurs titulaires de permis sont allés encore plus loin que les exigences minimales de leur permis et ont grandement contribué aux objectifs fondamentaux de radioprotection au Canada. Les résultats de ces efforts collectifs pour maintenir les irradiations à un faible niveau sont évidents quand on se rend compte des expositions professionnelles moyennes enregistrées par le Fichier dosimétrique national (17). On a également réussi à maintenir les expositions non réglementées des malades, dues aux diagnostics radiographiques (48) ou à l'utilisation de radionucléides en médecine nucléaire (4) à un faible niveau. Un exemple de programme officiel établi par un titulaire de permis précis pour maintenir les irradiations à un faible niveau est expliqué ailleurs plus en profondeur (21,48).

On prévoit que la réglementation de l'utilisation des matières radioactives au Canada (19) exigera à l'avenir des titulaires de permis qu'ils établissent et maintiennent des programmes pour que les doses des travailleurs et du public restent au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (voir paragraphe 4.1). Les travailleurs devraient disposer de toute

l'information pertinente sur les effets biologiques des rayonnements et sur les méthodes pour mesurer les nivaux de rayonnement, tout en insistant sur les méthodes appropriées pour protéger chaque travailleur, ses collègues et le public en général contre toute irradiation indue.

Tous les titulaires de permis doivent également assurer la surveillance des expositions de leurs travailleurs. Toute exposition supérieure (possible ou réelle) aux limites de dose des travailleurs sous rayonnement doit être rapportée à la CCEA. Certaines installations importantes sont autorisées par la CCEA à avoir leur propre service de dosimétrie dans les cas où le risque d'irradiations élevées existe et où il faut évaluer sans délai les doses de rayonnement reçues par les employées. Tous les relevés de dose sont envoyés au Fichier dosimétrique national du ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social.

5.5 Responsabilités des travailleurs

La protection contre les rayonnements, tout comme la protection contre tout autre risque dans le milieu de travail ou dans ses environs, ne peut être atteinte sans la pleine participation des travailleurs. Les travailleurs sous rayonnements devraient tendre à se protéger eux-mêmes, à protéger leur collègues et les autres personnes environnantes contre les dangers possibles d'irradiations indues.

Pour atteindre ces objectifs, les travailleurs sous rayonnements auraient besoin des connaissances suivantes :

(i) les principes fondamentaux de radioprotection,

(ii) les conditions du permis,

(iii) le matériel pour mesurer les niveaux de rayonnement,

(iv) le milieu de travail et les moyens de protection disponibles, comme appareils respiratoires, les gants, la ventilation, les matériaux de blindage et les exigences relatives à l'évacuation des déchets,

(v) les programmes d'urgence de l'installation.

Ces connaissances peuvent être acquises par des cours ou des programmes de formation des titulaires de permis, de concert avec les organismes gouvernementaux, les universités et d'autres ressources. Les connaissances doivent être mises à jour périodiquement à mesure que de nouvelles techniques ou des modifications sont introduites.

La connaissance des principes de radioprotection devrait inclure la connaissance des autres dangers au travail. La collaboration active au sein des comités mixtes d'hygiène et de sécurité des syndicats et de la gestion dans tous les domaines, y compris celui de la radioprotection, peut fonctionner efficacement pour atteindre ce but.

L'application du principe ALARA incombe en grande partie aux titulaires de permis puisqu'il s'agit souvent d'améliorations apportées à la conception de l'installation lorsqu'elles sont nécessaires pour accroître la protection des

travailleurs et du public (19). Toutefois, la conformité pratique au principe ALARA continue de dépendre de l'engagement autant des travailleurs que des gestionnaires au concept sous-jacent et à son application par les procédures d'exploitation et la formation appropriées (50). À cet égard, une exigence fondamentale est la volonté sincère des travailleurs d'acquérir les connaissances nécessaires pour protéger leur propre santé et celle d'autrui, tout en utilisant de façon opportune les meilleurs moyens de protection. La prévoyance et le soin attaché aux procédures de travail sûres sont primordiales.

6. RÉFÉRENCES

1. BEIR III Report, "The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Academy of Sciences, Washington, 1980.

2. UNSCEAR 1982 Report, "Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects", New York, United Nations, 1982.

3. CIPR, Publication n° 26, «Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique», Annales de la CIPR, vol. 1, n° 3, 1977.

4. B.C. Lentle and J.W. Scrimger, "Radiation Doses from Diagnostic Medical Procedures, Report to the Advisory Committee on Radiological Protection, Ottawa, Atomic Energy Control Board, 1985.

5. ICRP, Publication 45, "Quantitative Base for Developing a Unified Index of Harm", Annals of the ICRP, vol. 15, no. 3, 1985.

6. UNSCEAR 1986 Report, "Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation", New York, United Nations, 1986.

7. N.W. Timofeeff-Ressovsky, 'Zu Frage der Bezeihungen zwischen strahlenausgelosten Punkt- und Chromosomenmutationen bei *Drosophila*', Chromosoma, 1939, vol. 1, s. 310-316.

   W.P. Spencer and C. Stern, "Experiments to Test the Validity of the Linear R-Dose/Mutation Frequency Relation in *Drosophila* at Low Doses", Genetics, 1948, vol. 33, pp. 43-74.

   H. Markovitch, "The Problem of the Biological Action of Low Doses of Ionizing Radiation", Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy II, 1956, pp. 244-247.

   C.H. Naumann, A.G. Underbrink and A.H. Sparrow, "Influence of Radiation Dose Rate on Somatic Mutation Induction in *Tradescantia Stamen* Hairs", Radiation Research, 1975, vol. 62, pp. 79-96.

   P. Unrau, F.K. Zimmermann and L.D. Johnston, "Linear Dose Response of Gene Conversion in *Saccharomyces cerevisiae* after Ionizing Radiation", Radiation Research, 1981, vol. 85, pp. 349-354.

8. W.L. Russell, L.O.B. Russell and E.M. Kelly, "Radiation Dose Rate and Mutation Frequency, Science, 1958, vol. 128, pp. 154-155.

   W.L. Russell and E.M. Kelly, "Mutation Frequencies in Male Mice and the Estimation of Genetic Hazards of Radiation in Men", Proceedings of the National Academy of Science USA, 1982, vol. 79, pp. 542-544.

9. W.J. Schull, *et al.*, "A Reappraisal of the Genetic Effects of the Atomic Bombs: Summary of a Thirty-Four Year Study", Science, 1981, vol. 213, p. 1220.

10. U.S. Department of Health and Human Services. Ad Hoc Working Group to Develop Radioepidemiological Tables, Report to the National Institutes of Health, NIH Publication No. 85-2748, Washington, 1985.

E, Huberman and S.H. Barr (ed.), Carcinogenesis – A Comprehensive Survey, Vol. 10, The Role of Chemicals and Radiation in the Etiology of Cancer, New York, Raven Press, 1985.

11. E.E. Pochin, "Malignancies following Low Radiation Exposures in Man, British Journal of Radiology, 1976, vol. 49, pp. 577-579.

12. ICRP, Publication 32, "Limits for inhalation of radon daughters by workers", Annals of the ICRP, 1981, vol. 6, no. 1.

13. D.K. Myers and M.M. Werner, "A Review of the Health Effects of Energy Production", Nuclear Journal of Canada, 1987, vol. 1, pp. 14-24.

D.K. Myers *et al.*, Comparison of the Health Benefits and Health Risks of Energy Development", in Risks and Benefits of Energy Systems, Vienna, International Atomic Energy Agency, 1984, p. 289.

L.D. Hamilton, "Health and Environmental Risks of Energy Systems", in Risks and Benefits of Energy Systems, *ibid.*, p. 21.

E. Siddall, "Safety Policy in the Production of Energy", Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-7540, 1982.

L.A. Sagen and A.A. Afifi, "Health and Economic Factors affecting Mortality", in Energy Risk Management, ed. by G.T. Goodman and W.D. Rowe, New York, Academic Press, 1980.

B.L. Cohen and I.S. Lee, "A Catalog of Risks", Health Physics, 1979, vol. 36, p. 707.

14. ICRP, Publication 37, "Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection", Annals of the ICRP, 1983, vol. 10, nos. 2/3.

15. ICRP, "Statement from the Paris Meeting", Annals of the ICRP, 1985, vol. 15, no. 3.

16. Labour Canada. Occupational Safety and Health Branch, "Work Injury Experience and Cost in Canada 1971-1980", Ottawa, 1982.

17. W.N. Sont and J.P. Ashmore, "Projected Whole-Body Career Doses for Radiation Workers in Canada", Health Physics, 1984, vol. 47, p. 693.

18. Ontario. Ham Commission, "Report of the Royal Commission of the Health and Safety of Workers in Mines; J.H. Ham, Commissioner", Toronto, 1976.

19. Commission de contrôle de l'énergie atomique, "Projet de remaniement du Règlement sur le contrôle de l'énergie atomqiue" document de consultation C-83, Ottawa, 1983.

20. Commission de contrôle de l'énergie atomique. Comité consultatif de la radioprotection et Comité consultatif de la sûreté nucléaire, rapport «Application du processus ALARA» en préparation.

21. R. Wilson *et al.*, "The Application of ALARA in Ontario Hydro", paper presented at Health Physics Society Meeting, Chicago, 1985, Report HSD-IR-85-6, Ontario Hydro, Toronto, 1985.

J.E. LeSurf *et al.*, "Occupational Radiation Exposure at Canadian CANDU Nuclear Power Stations", Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-7769, 1982.

22. D. Beninson and B. Lindell, "Bases and Trends in Radiation Protection, Seminar on Interface Questions in Nuclear Health and Safety, Paris, OECD Nuclear Energy Agency, 1985.

B. Lindell, "Concepts of Collective Dose in Radiological Protection", Paris, OECD Nuclear Energy Agency, 1984.

23. United Kingdom. National Radiological Protection Board, "More on ALARA", Editorial, Chilton (U.K.), 1986.

24. IAEA, "Assigning a Value to Transboundary Radiation Exposure", IAEA Safety Series No. 67, Vienna, 1985.

25. E.G. Létourneau, "Radon Standard for Canada. Indoor Air Quality in Cold Climates: Hazards and Abatement Measures, Ottawa, April 1985.

E. G. Létourneau, "Limitation of Exposure to Natural Radioactivity in Canada", Seminar on Exposure of Enhanced Natural Radiation and Its Regulatory Implications, Maastricht (Netherlands), March 1985.

26. CCEA, «Objectifs, exigences et lignes directrices pour l'évacuation des déchets radioactifs», projet de déclaration de principe en matière de réglementation, document de consultation C-104, Ottawa, 1986.

27. CCEA, «Base pour exempter l'évacuation de certaines matières radioactives de l'obtention d'un permis», projet de déclaration de principe en matière de réglementation, document de consultation C-85, Ottawa, 1985.

CCEA. Comité consultatif de la radioprotection et Comité consultatif de la sûreté nucléaire, rapport «Débits de dose *de minimis* recommandés au Canada» (CC-1), Ottawa (en publication).

28. ICRP, "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Wastes", Publication 46, Annals of the ICRP, 1985, vol.15, no. 4.

29. CCEA, «Révision des quantités réglementaires de substances radioactives prescrites», Ottawa, 1985.

30. J. Bromley, "Comparing the Hazards of Coal and Uranium Mining", Atom 365, 1987, pp. 3-9.

31. ICRP, "Recommendations of the ICRP and Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation", Publication 2, Pergamon Press, 1959.

32. J.S. Mitchell, "Memorandum on Some Aspects of the Biological Action of Radiations, with Especial Reference to Tolerance Problems, Document I-17, National Research Council, Atomic Energy Project, Montreal, 1945.

33. ICRP, "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers", Publication 30, Annals of the ICRP, 1979, vol. 2, nos. 3-4/1979 to vol. 8, nos. 1-4\1982.

IAEA, "Radiation Protection of Workers in the Minign and Milling of Radioactive Ores", IAEA Safety Series No. 26, Vienna, 1983.

ICRP, "Radiation Protection of Workers in Mines", Publication 47, Annals of the ICRP, 1986, vol. 16, no. 1.

34. S.H. Ching *et al.*, "Gamma doses and Radcn Daughters Exposures in Some Canadian Uranium Mines and Implications with Respect to hte Proposed Regulatory Amendments", in H.Stocker (ed.), Occupational Radiation Safety in Mining, Toronto, Canadian Nuclear Association, 1985.

35. CCEA. Comité consultatif de la radioprotection, «Calcul estimatif du risque en cas d'exposition aux émetteurs alpha», Rapport CCRP-1, Ottawa, 1982.

36. ICRP, "Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters", Publication 50, Annals of the ICRP, 1987, vol. 17, no. 1.

37. E.G. Létourneau *et al.*, "The Female Radiation Worker", paper presented at the Canadian Radiation Protection Association Annual Meeting, Toronto, 1983.

38. Modification au Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique, DORS/85-335, Gazette du Canada Partie II, avril 1985, vol. 119, no. 9, p. 1884.

39. U.S.A. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Review of NCRP Radiation Dose Limit for Embryo and Fetus in Occupationally-Exposed Women", NCRP Report No. 53, Washington, 1977.

40. United Nations. Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report A/7613, General Assembly Official Records 24th Session, suppl. no. 13, New Yorl., 1969.

41. M. Otake and W.J. Schull, "*In utero* Exposure to A-Bomb Radiation and Mental Retardation; a Reassessment", British Journal of Radiology, 1984, no. 57, p. 409.

42. CCEA. Comité consultatif de la radioprotection, «Dommage causé aux enfants des femmes en âge de procréer employées dans l'industrie nucléaire», Rapport CCRP-6, Ottawa, 1984.

43. Santé et Bien-être social Canada, Le Fichier dosimétrique national, document 83-EHD-89, Ottawa, 1982.

44. R.G. McGregor *et al.*, "Background Concentrations of Radon and Radon Daughters in Canadian Homes", Health Physics, 1980, no. 39, p. 285.

E. G. Létourneau *et al.*, "Lung Cancer Mortality and Indoor Radon Daughter Concentrations in 18 Canadian Cities", Sixteenth Midyear Topical Meeting, Epidemiology Applied to Health Physics, Albuquerque, 1983.

45. Santé et Bien-être social Canada, «Lignes directrices pour la qualité de l'eau potable au Canada», Ottawa, 1978.

46. Santé et Bien-être social Canada, «Plan fédéral d'urgence nucléaire», Ottawa, 1984.

47. J.R. Alderman, «Occupational Health and Safety of Workers in Saskatchewan Uranium Mines", in M. Gomez (ed.), Radiation Hazards in Mining, New York, Society pf Mining Engineers, 1981.

48. K.W. Taylor *et al.*, "Variations in X-Ray Exposures to Patients", Journal of the Canadian Association of Radiologists, 1979, no. 30, p. 6.

49. R. Wilson *et al.*, "Occupational Dose Reduction Experience in Nuclear Power Stations", Toronto, Ontario Hydro, Report HSD-IR-85-1, 1985.

50. G.A.M. Webb, "Board Advice on Cost-Benefit Analysis", Chilton (U.K.), National Radiological Protection Board, Radiological Protection Bulletin No. 72, 1986.

GLOSSAIRE

accident au travail : Blessure fatale ou non subie par tout travailleur au travail. Les accidents au travail comptent actuellement pour 6 pour 100 de toutes les morts violentes au Canada.

acide déoxyribonucléique (ADN) : Matière génétique qui se trouve dans tous les organismes vivants et qui porte les instructions héréditaires des processus vitaux.

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique.

ALARA : Principe selon lequel toute exposition doit être maintenue au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

avantage : En général, tout ce qui est jugé comme souhaitable, par exemple, la nourriture, la santé, l'abri, le travail, la prospérité, les produits de consommation, les services médicaux, le transport, un mode de vie désirable, etc. Le terme «avantages pour la santé» est limité au maintien et à l'amélioration de la santé et de l'espérance de vie générales.

becquerel (Bq) : Unité d'activité égale à une désintégration par seconde. Jusque dans les années 70, l'unité utilisée était le curie (27 picocuries = 1 becquerel).

BEIR : Biological Effects of Ionizing Radiation (Comité consultatif subventionné par l'Environmental Protection Agency des États-Unis, qui se rapporte à la National Academy of Science des États-Unis).

cancer : Tumeur maligne de grosseur possible illimitée, capable d'envahir les tissus environnants ou de s'étendre à d'autres parties du corps par métastase. Certains cas de cancer sont fatals, tandis que d'autres dans certains tissus, comme la peau et la thyroïde, sont normalement curables par suite d'intervention médicale.

CCEA : Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada.

CCRP : Comité consultatif de la radioprotection de la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada.

CIPR : Commission internationale de protection radiologique.

débit de dose : Quantité de dose par unité de temps.

dommage : En général, tout ce qui est jugé comme indésirable ou comme étant un obstacle à obtenir des avantages. Cette catégorie comprend tout effet nuisible sur la santé et la longévité.

dose : La quantité d'énergie de rayonnement reçue par unité de masse de tissu, normalement exprimée en joules par kilogramme. Par souci de simplicité, le terme est utilisé dans le présent document (à moins d'avis contraire) pour référer aux quantités d'intérêt général en radioprotection, notamment l'équivalent de dose et l'équivalent de dose effectif (voir définitions).

dose collective : Somme des doses de rayonnement individuelles reçues par un groupe de personnes, exprimée en personnes-sieverts.

dose engagée : Dose totale reçue par le corps durant les 50 années qui suivent l'incorporation d'une substance radioactive.

dose seuil : Dose minimale en deçà de laquelle il n'existe aucun effet ou réponse biologique donné.

engagement de dose : Somme de toutes les doses reçues par suite du rejet ou de l'incorporation d'une quantité donnée de matières radioactives. Les engagements de dose collectifs sont calculés pour de longues périodes de temps qui, en principe au moins, sont infinies.

équivalent de dose : Quantité représentant toutes les doses de rayonnement sur une échelle biologique commune. Par exemple, les particules alpha qui sont émises durant la désintégration de certaines matières radioactives sont beaucoup plus efficaces biologiquement que les rayons X par unité d'énergie absorbée par un tissu. C'est pourquoi les doses exprimées en énergie absorbée par kilogramme de tissu sont multipliées par un facteur de qualité (Q) accepté internationalement, qui traduit l'efficacité biologique relative des différents types de rayonnement; le résultat est mieux connu comme équivalent de dose. L'unité standard internationale de l'équivalent de dose est le sievert (voir définition); certains multiples plus convenables, comme le millisievert (voir définition) sont fréquemment utilisés dans le présent document.

équivalent de dose effectif : Somme des équivalents de dose reçus par les différents tissus du corps humain, chacun étant multiplié par le facteur de pondération prévu pour chaque tissu et recommandé internationalement. Le facteur de pondération traduit la probabilité qu'une unité de dose de rayonnement au tissu visé entraînerait un cas de cancer fatal chez la personne irradiée ou un sérieux tare génétique chez les enfants et les petits-enfants de de la même personne. La somme des facteurs de pondération de tous les tissus du corps est 1,0; l'équivalent de dose effectif est exprimé par la même unité (soit le sievert) que l'équivalent de dose.

foetus : Enfant en train de se développer dans l'utérus de la mère, entre la fin du deuxième mois de grossesse et la naissance. Le terme «embryon» est utilisé pour désigner l'enfant qui se développe durant les deux premiers mois de la grossesse.

in utero : Dans l'utérus.

médecine : Art et science de rétablir ou de préserver la santé.

microsievert (μSv) : Un millionième de sievert.

millisievert (mSv) : Un millième de sievert.

NCRP : National Council on Radiation Protection and Measurements des États-Unis.

neutron : Particule subatomique non chargée qui est capable de produire des rayonnements ionisants comme conséquence indirecte de ses collisions avec des noyaux atomiques.

non stochastique : Terme utilisé pour qualifier les effets biologiques des rayonnements ionisants qui n'apparaissent pas avant que la dose de rayonnement dépasse une dose seuil. La dose seuil varie beaucoup dépendant du débit de dose et de l'effet biologique visé.

numéro atomique : Numéro propre de chaque élément et égal au nombre de protons dans le noyau atomique de l'élément.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

particule alpha : Particule à charge positive émise durant la désintégration de certains noyaux atomiques instables, dont la charge et la masse sont les mêmes que le noyau d'un atome d'hélium.

période : Délai requis pour qu'un radio-isotope perde la moitié de son activité par désintégration. La période varie selon le radioisotope et lui est propre.

principe ALARA : Voir ALARA.

produits de filiation du radon : Radionucléides à période courte produit par la décroissance du radon 220 et du radon 222. Les descendants radioactifs à période courte produits par la désintégration du radon 220 sont aussi connus comme «produits de filiation du thoron».

radioactif : Terme utilisé pour désigner les matières qui peuvent émettre des rayonnements ionisants, par suite de la décroissance ou de la désintégration spontanée de noyaux atomiques instables dans ces matières.

radioisotope : Voir «radionucléide».

radionucléide : Forme particulière d'un élément, caractérisé par une masse atomique et un numéro atomique propres, et dont le noyau atomique est instable et décroît ou se désintègre selon une probabilité statistique caractérisée par sa période.

rayonnement : Voir «rayonnement ionisant».

rayonnement bêta : Particule chargée émise durant la désintégration de certains noyaux atomiques instables, dont la charge (+1 ou -1) et la masse sont semblables à celles d'un électron.

rayonnement ionisant : Rayonnement qui a suffisamment d'énergie pour déloger les électrons d'un atome et produire ainsi des ions dans un milieu gazeux autrement non ionisé. Les rayonnement ionisants comprennent les rayons X, les rayons gamma, le rayonnement bêta, les particules alpha et d'autres noyaux atomiques rapides. Les neutrons produisent aussi des rayonnements ionisants par interaction avec la matière. Les rayonnements ionisants peuvent aussi produire des radicaux libres dans des tissus vivants, ce qui peut provoquer des modifications chimiques nuisibles aux composants des tissus.

rayons gamma : Rayonnement électromagnétique à ondes courtes, d'origine nucléaire, qui est émis durant la désintégration de certains noyaux atomiques instables.

rayons X : Rayonnement électromagnétique à ondes courtes émis durant certains réarrangements de la couche électronique d'un atome. Les rayons X peuvent être produits durant la désintégration radioactive ou par suite du ralentissement d'électrons rapides dans n'importe quelle matière. Ils sont normalement obtenus d'une machine de radiographie dans laquelle une cible métallique est bombardée par des électrons rapides dans un vide élevé.

secteur industriel sûr : Tout secteur où la probabilité de mortalité au travail ne dépasse pas 1 par 10 000 travailleurs par année. Environ 80 pour 100 de tous les travailleurs au Canada sont employés dans des secteurs industriels sûrs.

sievert (Sv) : Unité d'équivalent de dose ou d'équivalent de dose effectif (voir définitions). L'équivalent de dose en sieverts est égale à la dose absorbée en joules par kilogramme (J/kg) multipliée par le facteur de qualité approprié qui est traditionnellement 1 pour les rayons X, le rayonnement bêta et les rayons gamma, et 20 pour les particules alpha. Avant 1977, les équivalents de dose étaient exprimés en rem (100 rem = 1 sievert).

stochastique : Terme utilisé pour qualifier les effets biologiques des rayonnements ionisants dont on croit que la probabilité croît en fonction directe de toute augmentation de dose de rayonnement à faibles doses ou à faibles débits de dose. Les effets biologiques visés sont des cas de cancer et les tares génétiques dus aux rayonnements; par prudence, les cas de déficience mentale grave causés par l'irradiation du foetus peuvent être inclus dans cette catégorie. Tout processus stochastique incorpore un élément aléatoire; le nombre de coups aléatoires augmentera en moyenne en proportion directe au nombre de projectiles aléatoires auxquels la cible est exposée.

tare génétique : Maladie héréditaire, ou plus spécifiquement désordre individuel grave des caractéristiques moyennes des populations humaines, d'origine génétique ou partiellement génétique, qui exige des soins médicaux à un moment donné de la vie du malade. Il existe plus d'un millier de désordres héréditaires, comme l'albinisme, la surdité héréditaire chez les vieillards et le mongolisme (syndrome de Down).

titulaire de permis : Personne ou organisme autorisé par la Commission de contrôle de l'énergie atomique ou une autorité provinciale à posséder et à utiliser des sources de rayonnement ionisant.

travailleur sous rayonnements : Toute personne qui, dans le cours de son travail lié aux substances radioactives ou à une installation nucléaire, pourrait recevoir une dose de rayonnements ionisants supérieure à 5 mSv par année. L'expression est utilisée dans son sens large pour désigner également les opérateurs de machines de radiographie (rayons X) et d'accélérateurs.

UNSCEAR : Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).

WLM : Unité alpha-mois (working level month), défini d'abord comme l'exposition durant 170 heures de travail dans une atmosphère contenant 100 picocuries (3,7 Bq) de radon 222 par litre en équilibre avec ses produits de filiation à période courte. Si le taux de respiration horaire moyen est de 1,2 m^3 (1200 L/h), 1 WLM est égal à la respiration de produits de filiation dont l'énergie totale potentielle de particules alpha est de 4,2 millijoules. L'énergie potentielle alpha est la somme de toutes les énergies alpha de tous les produits de filiation à période courte dans une famille radioactive. Dans la famille radioactive du radon 222, les particules alpha d'énergie semblable sont émis successivement par le polonium 218 et le polonium 214; ainsi, l'énergie potentielle alpha par atome de polonium 218 déposée dans le système respiratoire est environ deux fois celle du polonium 214.

ANNEXE A

HISTOIRE DE LA RADIOPROTECTION AU CANADA

L'histoire de la radioprotection remonte aux toutes dernières années du XIX^{e} siècle. Bien que les spécialistes canadiens aient été au courant des premières découvertes internationales, les premières recommandations canadiennes au sujet de la radioprotection datent de 1945 environ. Pour en faciliter la consultation, l'histoire qui suit a été divisée arbitrairement en décennies.

1896-1905 : Découverte

Les événements se sont succédé très rapidement après la découverte des rayons X par Roentgen, en 1895 (1), et de la radioactivité naturelle par Becquerel, en 1896 (2). Dès 1896, des pionniers britanniques avaient déjà utilisé les rayons X pour repérer une aiguille enfoncée dans une main. En 1897, on rapportait déjà l'épilation du crâne et 23 cas de dermatite dus aux rayonnements (3). Les rayons X ont été utilisés pour guérir un cancer de la peau en 1899 (4), mais peu après, en 1902, un cas de cancer de la peau à la main a été rapportée par suite d'une dermatite typique due aux rayonnements d'un employé d'usine de tubes roentgen (5). En 1901, Becquerel a observé une «brûlure due au radium» sur la peau de quelqu'un (6). Les effets des rayons X sur la moëlle, la croissance, la fertilité et la survie des animaux de laboratoire avaient déjà été observés avant la fin de la première décennie. Ces effets nuisibles avaient suscité de l'inquiétude en Angleterre, et, dès 1898, le conseil de la Roentgen Society avait décidé de recueillir des renseignements sur les effets délétères des rayons roentgen.

Rollins entreprit les premières tentatives de radioprotection en suggérant que l'intensité ne serait pas dangereuse si les rayons X n'embrouillaient pas la plaque photographique au bout de sept minutes. Il déclara aussi qu'il était fondamental de prévenir la fuite de tout rayonnement inutile pour prendre une radiographie ou pour illuminer l'écran (7). Sa déclaration représente peut-être le premier effort vers le principe de maintenir les doses au niveau le plus bas qu'il est raisonnablement possible d'atteindre.

Ainsi, dès la première décennie, on avait établi que les rayons X étaient utiles dans les diagnostics médicaux et le traitement des maladies. Par contre, on avait noté également le risque de dermatites, de dommages à la moëlle et de tumeurs malignes, et on avait pris les premières mesures pour minimiser les expositions.

1906-1915 : Dispositifs de protection

Durant cette période, on s'est rendu compte à quel point la protection était nécessaire. Les radiologistes commencèrent alors à se servir de dispositifs de protection, comme des tabliers et des gants. À la fin de cette période, la Roentgen Society d'Angleterre recommandait que «la sécurité personnelle des opérateurs de machines de radiographie devrait être assurée par l'adoption universelle de règles strictes.»

1916-1925 : Création des comités

À la fin de la Première Guerre mondiale, la protection demeurait une application *ad hoc*, mais l'inquiétude était suffisante pour entraîner la création du Roentgen Ray Protection Committee, aux États-Unis, et du X-Ray and Radium Protection Committee, en Grande-Bretagne. Le comité britannique fit les deux recommandations pragmatiques suivantes : a) la quantité de plomb de blindage nécessaire pour protéger les opérateurs; b) le besoin d'établir une dose maximale tolérable selon une norme biologique déterminable et reproductible, et si possible, capable d'être exprimée en unités physiques. À cette époque, il n'existait pas suffisamment de données pour exprimer la dose maximale tolérable en unités physiques. La meilleure suggestion jusqu'en 1925 fut celle de Mutscheller qui recommanda que 1/100 d'une dose d'érythème pourrait être tolérée par période de 30 jours (8). (On sait maintenant que la dose d'érythème, c'est-à-dire la dose minimale nécessaire pour faire rougir la peau, va d'environ 300 roentgens provenant de rayons X doux non filtrés à environ 1000 roentgens provenant de rayons gamma à haute énergie. Les États-Unis ont adopté une valeur moyenne officielle de 600 roentgens, en 1931.) Durant les 10 années à venir, on consacrerait beaucoup d'attention à la dose d'érythème comme norme biologique déterminable, mais l'attention se porterait surtout sur les mesures physiques. Le premier congrès international de radiologie, en 1924, sous les auspices de la Société internationale de radiologie, avait entre-temps établi le Comité international des unités de rayons X pour étudier des moyens de mesurer les expositions aux rayonnements en unités physiques (9).

1926-1935 : Quantification des expositions

Au début de la période, on commençait à disposer des outils nécessaires pour quantifier physiquement les expositions. Fricke et Glasser avaient mis au point une chambre d'ionisation dont la réponse était équivalente à celle de l'air (10). Il fut alors possible de mesurer précisément les expositions selon la quantité d'ionisation produite. Le Comité international des unités de rayons X, formé depuis peu, qui allait devenir plus tard la Commission internationale des unités et des mesures radiologiques (CIUR), s'était entendu sur la définition de «roentgen» comme l'unité d'exposition due aux rayons X et mit fin à la confusion de la foule d'unités qui avaient été suggérées. (Le roentgen a été défini, en 1928, comme étant «la quantité de rayons X qui, lorsque les électrons secondaires sont pleinement utilisés et que l'effet de paroi de la chambre est évité, produit dans 1 cm^3 d'air atmosphérique à 0 °C et 76 cm de pression dans une colonne de mercure une telle conductivité que 1 unité de charge électrostatique est mesurée au courant de saturation».) La voie était désormais ouverte pour que la dose d'érythème tolérable puisse être exprimée en unités physiques.

Deux nouveaux comités commencèrent à jouer le rôle le plus important en radioprotection. En 1928, le deuxième congrès international de radiologie créait le Comité international de protection contre les rayons X et le radium, qui allait plus tard devenir la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (9). En même temps était créé, aux États-Unis, le Advisory Committee on X-Rays and Radium Protection qui allait devenir plus tard le National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) (9).

Les premiers rapports des deux comités ne fournissaient pas de lignes directrices quantitatives sur les doses tolérables. Ils traitaient plutôt de blindage et de conditions de travail. Une des caractéristiques, maintenant abandonnée, des conditions de travail recommandées était les longs congés accordés aux travailleurs sous rayonnements. La nécessité de protéger les malades apparaissait pour la première fois dans le rapport américain.

En 1934, les deux comités avaient déjà réussi à quantifier l'exposition tolérable, quoique leurs résultats soient légèrement différents. Le Comité international recommanda d'abord 0,2 roentgen par jour pour les rayons X (11), qui fut ensuite réduit à 1 roentgen par semaine, soit 50 roentgens par année. Le Comité américain recommanda 0,1 roentgen par jour, surtout pour les expositions aux rayons gamma du radium, mais deux ans plus tard, il adopta la même valeur pour les rayons X (12). La valeur inférieure qu'il adoptait traduisait sans doute l'importance qu'il accordait aux résultats obtenus à partir des irradiations dues au radium, tandis que le Comité international se penchait toujours surtout sur les rayons X. L'incertitude à propos des mécanismes biologiques produisant des effets observables, par exemple la réduction de la numération globulaire du sang, faisait hésiter le Comité international à recommander une valeur pour les rayons gamma du radium.

Le concept d'exposition tolérable préconisé par ces deux comités fut généralement accepté, mais il y eut également certaines réserves. Par exemple, Muller interpréta ses résultats (13) comme une indication de relation linéaire sans seuil entre l'exposition et les effets génétiques sur la drosophile (mouche du vinaigre). D'autres s'inquiétaient du concept du seuil. Néanmoins, à la fin de la décennie, en 1935, il existait une unité physique d'exposition utilisable, une méthode pour en mesurer la quantité, ainsi qu'une limite d'exposition tolérable acceptée.

1936-1945 : Ère nucléaire et radiohygiénistes professionnels

En 1937, le Comité international étendit la liste des tissus et des organes qu'il considérait comme critiques, pour inclure la peau et d'autres tissus superficiels, les organes produisant le sang et les gonades (14), mais il n'existait toujours pas de dose de rayons gamma tolérable recommandée internationalement. L'effort de guerre et, en particulier, le projet Manhattan, utilisèrent une dose tolérable de 0,1 roentgen par jour, sous réserve d'une limite hebdomadaire de 0,5 roentgen. Une des caractéristiques les plus notables du projet fut la création d'un nouveau type de professionnel. On demanda à certains physiciens et chimistes de s'intéresser aux conséquences des nouvelles sources de rayonnement qu'ils utilisaient, sur la santé. Ils furent ainsi les premiers spécialistes de radioprotection, mais aujourd'hui ils proviennent de disciplines beaucoup plus variées.

Le projet américain "Manhattan" évolua sous le sceau du secret le plus strict. La plupart des gens n'eurent connaissance de l'arrivée de l'ère nucléaire qu'au moment où deux bombes atomiques furent larguées sur Hiroshima et Nagasaki, en août 1945, mettant rapidement fin à la Seconde Guerre mondiale.

Le Projet canadien d'énergie atomique fut établi en 1942 et fut exploité d'abord aux laboratoires de Montréal, puis à Chalk River (Ontario), sous les auspices du Conseil national de recherche. Dès le début, la radioprotection fit partie des objectifs importants. Dans un document de 1945, J.S. Mitchell étudie les effets biologiques des rayonnements et présente des recommandations de radioprotection au sein du projet canadien d'énergie atomique. Il est intéressant de noter certains passages qui soulignent le niveau avancé de compétence que le Canada possédait à cette époque en matière de radioprotection :

> «À l'heure actuelle [1945], il existe probablement assez de données pour fournir une base fiable pour la protection de la santé des travailleurs qui utilisent des rayonnements ionisants et la plupart des substances radioactives, dans la mesure où il est question d'effets à court terme. Toutefois, les connaissances relatives aux effets possibles à long terme comportent de sérieuses lacunes [...] Avant de pouvoir examiner quantitativement tout effet biologique, il est fondamental d'être capable de mesurer l'agent qui le produit avec une exactitude suffisante [...] La première étape pour déterminer la dose au tissu est de mesurer la dose dans l'air; dans ce but, le roentgen est introduit comme unité et représente la seule unité satisfaisante qui soit disponible.» (Traduction.)

Les maladies les plus importantes à envisager en prévoyant des méthodes de protection des employés sont énumérées par Mitchell dans un résumé qui semble toujours valable 40 ans plus tard. Dans le cas des tumeurs malignes, y compris la leucémie, provoquées par de faibles doses de rayonnement répétées, on note que :

> «Les symptômes de tumeur maligne ou de leucémie commencent probablement, du moins dans certains cas, à partir d'une cellule unique qui a été transformée irréversiblement [...] La leucémie doit maintenant être considérée comme l'une des maladies professionnelles dues aux rayonnements et aux substances radioactives. Bien que des soupçons existassent depuis 1911 (Jagie *et al.*), des preuves étiologiques convaincantes, appuyées par des expériences sur des animaux, n'ont été présentées que durant les quelques dernières années [...] Les résultats laissent supposer que l'un des facteurs qui provoquent la leucémie due aux rayonnements est un processus irréversible qui est proportionnel à la dose totale et qui compte peu de chance de guérison – peut-être une mutation somatique. La question est évidemment si importante que beaucoup plus de recherches sont requises de la façon la plus pressante.» (Traduction.)

Mitchell accorda aussi une grande importance aux risques génétiques des rayonnements (15), comme l'illustre la citation suivante :

> «Les rayonnements semblent augmenter le taux de mutations spontanées et on croit en général que l'irradiation ne produit pas de nouveaux types de mutations génétiques. La mutation génétique due aux rayonnements ionisants est : (i) un processus irréversible, (ii) linéairement proportionnel à la dose au tissu, c'est-à-dire le nombre total de paires d'ions par unité de volume, (iii) indépendant de la distribution temporelle de la dose (fractionnement ou dilution étalé sur une gamme d'intensité variant par un facteur de 500), (iv) indépendant de l'énergie des rayons X et des rayons

> gamma de 0,005 à 0,8 MeV, (v) présent à tous les stades de maturité des cellules reproductrices. La plupart des travaux sur les mutations génétiques ont été exécutées sur la drosophile (mouche du vinaigre) [...] La plupart des caractères mendéliens dus aux mutations génétiques sont récessifs et indésirables [...] La valeur actuelle du débit de dose tolérable pour l'irradiation du corps entier aux rayons gamma du radium est de 0,1 roentgen par jour (National Bureau of Standards Handbook H-23, Washington, 1938) [...] En établissant la dose tolérable qui est considérée comme beaucoup plus satisfaisante que toute autre valeur suggérée auparavant, tous les effets génétiques et dommages hérités ont été ignorés délibérément [...] Les expériences détaillées pour provoquer des mutations génétiques dues aux rayonnements ionisants chez la drosophile ont soulevé d'importantes questions qui n'ont toujours pas trouvé de réponse [...] Jusqu'à ce que des réponses précises soient apportées, il est clair que de tels problèmes peuvent créer de l'anxiété, mais il faut savoir replacer les choses en perspective [...] On propose donc de retenir la valeur de 0,1 roentgen par jour recommandée par le National Bureau of Standards comme débit de dose tolérable officiel pour l'irradiation du corps entier par des rayons gamma et de s'efforcer en même temps, au sein des projets canadiens et britanniques d'énergie atomique, de ne jamais dépasser la valeur de 0,05 roentgen par jour.» (Traduction.)

Le Projet canadien d'énergie atomique réduisit donc les doses de rayonnement maximales recommandées à environ 15 roentgens par année, avant que la CIPR ne fasse la même recommandation. Ces premières considérations d'une relation dose-réponse linéaire sans seuil pour les changements génétiques et la possibilité d'une relation similaire pour les cas de leucémie causés par les rayonnements ne furent pleinement incorporées dans les recommandations de la CIPR qu'en 1959.

On tint compte également de l'efficacité biologique relative (EBR) pour calculer les flux tolérables de neutrons (15). Les valeurs suggérées d'efficacité biologique relative étaient d'environ 10 pour des neutrons de 1 MeV, décroissant en fonction de l'énergie croissante jusqu'à environ 3 ou 4 pour des neutrons de 20 MeV. La CIPR adopta plus tard des valeurs semblables. L'un des risques les plus sérieux que le projet canadien d'énergie atomique envisagea fut la possibilité de cas de carcinomes du poumon dus à la respiration de poussières et de gaz radioactifs émettant un rayonnement alpha (15). Une efficacité biologique relative de 10 fut suggérée pour le calcul des «équivalents de dose roentgen» des particules alpha, d'après les études expérimentales avec les racines de haricots. La CIPR adopta plus tard des valeurs semblables. Les effets biologiques des différents type de rayonnements devaient être considérés comme additifs (15).

La possibilité de dommages au foetus, notamment le développement déficient du système nerveux central, fut aussi examinée. On recommanda en 1945 que les femmes ne devraient pas être employées dans le Projet canadien d'énergie atomique dans des domaines où il y avait risque sérieux d'irradiation.

L'une des recommandations du projet canadien d'énergie atomique prit malheureusement 20 ans avant d'être mise en vigueur. Après avoir examiné les expériences documentées dans les mines d'uranium de la région de Joachimshal-Schneeberg et identifié correctement les produits de filiation du radon pour la

première fois comme source principale de la dose à l'épithélium bronchique, Mitchell recommanda que la concentration de radon dans l'air ne devrait pas dépasser 5 x 10^{-11} curies par litre en tout endroit et en tout temps (15). En supposant un équilibre d'environ 50 à 100 pour 100 avec les produits de filiation du radon à ce moment-là, la recommandation aurait été égale à une exposition maximale admissible allant de 3 à 6 WLM par année dans les mines d'uranium. On sait maintenant qu'un nombre important de mineurs d'uranium sont morts du cancer du poumon parce qu'une recommandation semblable n'a pas été réellement appliquée à toutes les mines d'uranium canadiennes avant les années soixante-dix.

1946-1955 : Expansion de la radioprotection

C'est l'époque où l'énergie atomique a connu son grand déploiement, culminant en 1955 par la conférence «Atomes pour la paix», organisée par les Nations Unies. L'Agence internationale de l'énergie atomique est créée pour aider au développement des utilisations pacifiques des matières radioactives. Les laboratoires peuvent désormais se procurer des appareils de rayons X et les accélérateurs à haute énergie.

L'histoire de la réglementation nucléaire au Canada commence au début de cette période. En 1946, la Loi sur le contrôle de l'énergie atomique crée la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) et établit les dispositions législatives de la réglementation de l'énergie nucléaire . Le premier règlement canadien sur le sujet apparaît en 1947, mais la principale préoccupation à l'époque touchait surtout la sécurité de l'information et la sécurité matérielle. Comme les questions d'hygiène et de sécurité des personnes relevaient traditionnellement des provinces, il y avait peu de référence à la radioprotection, sauf à quelques précautions «raisonnables et appropriées» pour la radioprotection. La CCEA incitait plutôt les provinces, par l'intermédiaire du Conseil fédéral de la santé à établir des règlements sur la protection contre les rayonnements. Le Règlement fut révisé à la fin de la décennie, en 1954, mais ne comportait aucune modification touchant l'hygiène et la sécurité.

Entre-temps, les travaux en radioprotection se poursuivaient au Canada, autant qu'au Royaume-Uni et et aux États-Unis. Dans un rapport de 1947 (16), G.C. Butler, de Chalk River, rappelait les principes selon lesquels il fallait supposer que le dommage initial qui provoquait les tumeurs dues aux rayonnements ionisants était «irrémédiable» et, plus encore, qu'il n'y avait pas de dose seuil pour les effets mutagènes des rayonnements et que la fréquence des mutations dans les gènes individuels est proportionnelle à la dose accumulée totale. Les expositions maximales admissibles des travailleurs étaient calculées pour certains radionucléides, y compris l'uranium, le plutonium et les produits de fission, comme le strontium 89, le strontium 90, l'iode 131 et les radioisotopes du krypton et du xénon (16). Ces limites calculées se basaient sur les doses tolérables acceptées, par exemple, 0,05 roentgen par jour (soit environ 15 roentgen par année) de rayons gamma ou de particules bêta (15), ou une charge corporelle maximale de 0,1 µg (0,1 µCi) de radium. La dernière valeur était dérivée du suivi épidémiologique de quelque 2000 peintres de cadrans de montre et autres personnes aux États-Unis qui avaient ingéré des quantités importantes de radium 226. Aucune quantité excessive de cas de cancer des os fatal était observée chez les personnes qui avaient moins de 1 µg de

radium de fixé dans l'organisme. En appliquant un facteur de sécurité de dix, le National Bureau of Standards des États-Unis recommanda une charge corporelle maximale de 1 µg ou 0,1 µCi de radium 226 dans les os, en 1941 (17), et la CIPR le confirma en 1950 (18). Étant donné l'absence de toutes autres données, cette valeur servit de base pendant plusieurs années pour calculer les incorporations maximales admissibles de plusieurs autres radionucléides ostréotopes. Bien que les recommandations actuelles de la CIPR soient calculées d'après une autre base, elles préconisent des quantités maximales semblables de radium fixé dans les os.

CONFÉRENCE TRIPARTITE : Au milieu de la décennie, un événement allait avoir des répercussions importantes sur la mise au point de la réglementation. En 1949, une conférence tripartite regroupant 23 représentants des États-Unis, du Royaume-Uni et du Canada fut tenue à Chalk River. Des notes et des procès-verbaux surgit une explosion de concepts, d'idées, de questions et de solutions aux problèmes qui allaient préparer le terrain pour des recommandations et de la réglementation nationales et internationales pendant les décennies à venir. Le Canada comptait huit participants, dont G.C. Laurence, qui allait devenir membre du CIUR en 1950 et, plus tard, président de la CCEA. J.S. Mitchell faisait partie de la délégation britannique.

Voici les sujets et les résultats les plus importants des discussions. Les paramètres de l'homme moyen ou «standard» furent précisés pour la première fois, surtout à partir des données recueillies par A.J. Cipriani de Chalk River. L'homme standard avait une masse de 70 kg, dont la composition chimique fondamentale, la masse des organes et les paramètres métaboliques sont à peu près les mêmes qu'aujourd'hui. On convint du premier modèle de poumon. Après de longues discussions, on conclut que les effets carcinogènes des «particules chaudes» seraient probablement moindres si de petites masses de tissu étaient irradiées que si les rayonnements étaient étalés sur une masse plus grande. La discussion et la conclusion réapparaîtront d'ailleurs quelques décennies plus tard.

Le concept de l'efficacité biologique relative (EBR) fut présentée. On décida de certaines valeurs. Fait à remarquer, il y eut une discussion à savoir si l'on devait utiliser des rayons X de 200 kV ou des rayons gamma du radium comme rayonnement de référence. L'assemblée tomba d'accord pour dire que les rayons gamma du radium étaient préférables parce qu'ils fourniraient une référence mieux définie que les rayons X, bien que ceux-ci fussent plus employés comme agents de comparaison dans les expériences. Ce fut l'une des recommandations qui ne fut pas adoptée et la CIPR choisit plus tard des rayons X de 200 kVp comme rayonnement de référence.

On s'accorda pour dire que les organes hématopoïétiques devraient être considérés comme le tissu critique et que l'exposition hebdomadaire de la moëlle ne devait pas dépasser 0,3 rep (roentgen equivalent physical). Le rep fut défini comme l'unité de dose de rayonnement qui produit une absorption d'énergie de 84 ergs par centimètre cube de tissu; cette valeur fut modifiée plus tard à 93 ergs. La limite d'exposition hebdomadaire aux rayons gamma de 0,3 rep est à peu près égale à 0,3 roentgen par semaine (mesuré à l'air libre, comme c'était l'habitude aux États-Unis) ou à 0,5 roentgen par semaine (mesuré à la surface du corps, comme c'était la pratique au Royaume-Uni. La différence des valeurs est

due en grande partie à l'augmentation des doses due à la rétrodiffusion lorsque les doses de rayonnement sont mesurées à la surface du corps. On se demanda s'il fallait établir une limite de dose à vie et la question est toujours débattue. L'exposition maximale des mains fut étudiée séparément et on en établit la valeur à 1,5 rep par semaine; c'est d'ailleurs foncièrement la valeur que la réglementation canadienne adopta plus tard. (Note : Le rep, qui était l'unité de dose absorbée, a rapidement été remplacé par le rad qui était égal à l'absorption d'énergie de 100 ergs par gramme de tissu. Le rad a été utilisé pendant plus de 20 ans jusqu'à ce qu'il soit remplacé récemment par le gray, unité internationale égale à 100 rad.)

On tint compte aussi du métabolisme et on établit la dosimétrie de certains émetteurs internes à la conférence de 1949. Dans le cas des agents ostéotropes, on estima les quantités minimales nuisibles et on décida d'utiliser un facteur de réduction de 10 pour dériver les quantités maximales admissibles. Il faut noter au passage que W.B. Lewis, de Chalk River, argua que, si la relation était linéaire entre le dommage et la dose, un facteur de 10 n'assurait pas un facteur de sécurité très important, tandis que d'autres prétendirent que cela était tout à fait cohérent avec la pratique chimique normale.

On discuta aussi des limites à utiliser pour les matières radioactives déposées dans l'organisme de la population en général. On décida d'un facteur 100 fois moindre que les valeurs pour les travailleurs, non sans appréhension, puisque cela représentait une valeur moyenne pour la population générale plutôt que pour un groupe critique, comme le pensent aujourd'hui plusieurs radiohygiénistes dans ce contexte. A. Brues, par exemple, notait que le facteur de sécurité nécessaire pour la population générale dépendait de l'absence d'augmentation statistiquement importante d'effets pathologiques. Il suggérait d'utiliser un facteur de réduction de 10 pour une population de 100 000 personnes et un facteur de réduction de 100 pour une population d'un million de personnes. C'est à partir de ces considérations que l'on en est venu plus tard à la possibilité de limiter ou non la dose collective.

Les participants étudièrent les 18 radionucléides les plus importants, assignèrent à chacun une charge corporelle maximale admissible et une concentration maximale admissible dans l'air et dans l'eau. Le ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social diffusa les recommandations au Canada, mais les répercussions les plus importantes se firent sentir par l'utilisation qu'en firent la CIPR et le NCRP, comme ils s'appelaient déjà à l'époque.

COMITÉS INTERNATIONAUX : En 1950, les travaux de la CIPR et de la CIUR reprirent grâce à l'intervention de Mayneord, au Royaume-Uni, et de Taylor, aux États-Unis. La composition des comités d'avant-guerre qui étaient pratiquement restés inactifs depuis 1937, fut presque complètement remaniée. Seuls l'Américain L.S. Taylor et le Suédois R.M. Sievert qui faisaient partie de l'ancienne équipe, par exemple, continuèrent de siéger à la CIPR. Ces comités reconstitués étaient dominés au départ par des gens originaires de pays qui avaient eu de l'expérience avec l'énergie nucléaire durant la guerre, mais dès 1953, la commission principale et les sous-comités de la CIPR comprenaient des experts scientifiques provenant de 10 pays. (Des experts de l'URSS et de divers autres pays de l'Europe de l'Est se joignirent à la CIPR en 1959. Plus récemment, les experts viennent d'Argentine, du Canada, de Chine, des États-Unis, de

France, de République fédérale d'Allemagne, du Japon, de Pologne, de Suède, d'URSS et de plusieurs autres pays.) Bien que la CIPR demeure un organisme non gouvernemental responsable seulement devant la Société internationale de radiologie, son mandat s'est grandement étendu non seulement à la protection contre les rayons X et le radium, mais à toutes les sources de rayonnements ionisants.

Le premier rapport de la nouvelle CIPR, en 1950 (18), recommandait une exposition maximale admissible de 0,5 roentgen par semaine à la surface du corps ou l'équivalent de 0,3 roentgen par semaine mesuré à l'air libre, comme on l'avait suggéré à la conférence de Chalk River, en 1949. On estimait que ces expositions «correspondaient à environ 0,3 roentgen par semaine (environ 15 roentgens par année) au tissu critique, c'est-à-dire les organes hématopoïétiques». Pour le calcul des expositions en roentgens équivalents, on recommanda une valeur d'efficacité biologique relative de 1 pour les rayons gamma, les rayons X et le rayonnement bêta, de 10 pour les protons et les neutrons rapides, et de 20 pour les rayons alpha. (La valeur de 10 pour les neutrons rapides d'une énergie approximative de 0,5 MeV est restée en vigueur jusqu'à ce qu'elle soit augmentée à 20 en 1984. La valeur de 20 pour les particules alpha a été réduite à 10 en 1954 (19) et augmentée de nouveau à 20, en 1973.) Il est intéressant de noter au passage qu'on parle désormais d'expositions maximales admissibles plutôt que d'expositions tolérables.

Durant la décennie, la CIPR, nouvellement reconstituée, commença à étudier les conséquences des relations dose-réponse linéaires sans seuil dans le cas des effets biologiques tardifs des rayonnements. Le concept d'avant-guerre de «doses tolérables» pourrait donner l'impression de comprendre le concept de dose seuil, mais comme le note L.S. Taylor (20), l'un des membres d'origine de la CIPR et du Comité international de la protection contre les rayons X et le radium qui l'a précédée, le concept de dose seuil n'a pas été discuté expressément et «l'établissement du niveau de tolérance se basait plutôt sur le fait que les effets étaient observables ou non, tout comme c'était l'approche commune aux problèmes similaires dus à tous les autres agents toxicologiques».

Par suite des travaux de H.J. Muller et de quelques autres généticiens sur la drosophile et d'autres organismes inférieurs, les biologistes acceptèrent généralement la linéarité sans seuil des effets génétiques des rayonnements dans les années quarante (15,16,20). D'après un généticien qui faisait partie de la CIPR auparavant, «les radiologistes médicaux éprouvaient une réticence compréhensible à croire qu'ils causaient des dommages en administrant des doses qu'ils considéraient comme faibles» (21). D'autre part, il n'existait pas à l'époque de données fiables à partir desquelles on pouvait évaluer quantitativement les répercussions chez les humains des observations chez la drosophile. Ce n'est seulement que durant les quelques décennies suivantes et au prix d'efforts appréciables que l'on a pu accumuler à Oak Ridge et dans d'autres laboratoires de recherche les données requises sur les animaux.

Dans ses recommandations de 1950, la CIPR (18) disait : «En dépit du fait que les valeurs proposées d'expositions maximales admissibles sont telles qu'elles n'entraînent qu'un faible risque par rapport aux autres risques de la vie, il est fortement recommandé de s'efforcer de réduire les expositions à toutes les sortes de rayonnements ionisants au niveau le plus bas possible, étant donné, d'une part, la nature insuffisante des preuves existantes à partir desquelles

un jugement doit être porté et, d'autre part, la connaissance que certains effets radiologiques sont irréversibles et cumulatifs.» En 1954, la CIPR faisait d'autres recommandations qui suggéraient, entre autres, que toute augmentation de débit de dose ne peut être considérée comme absolument sûre. La CIPR n'a pas dérogé à ces principes fondamentaux depuis.

SANTÉ ET BIEN-ÊTRE SOCIAL : En 1950, un service de radioprotection fut créé au sein de la Division de la santé dans les industries, du ministère de la Santé et du Bien-être social. À l'époque, la CCEA ne comptait que très peu d'employés. Comme les problèmes dus au développement de l'énergie nucléaire et de la médecine nucléaire grandissaient, de même que la prise de conscience croissante du besoin grandissant de précautions en utilisant les rayons X et l'inquiétude à propos des effets possibles de l'exposition aux rayonnements provenant de toutes sources des membres du public, les activités de radioprotection prirent également de l'ampleur. Pour faire face à la situation, le ministère de la Santé et du Bien-être social établit la Division de la radioprotection, qui fut rebaptisée le Bureau de la radioprotection et, plus tard, le Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux, comme entité distincte dont l'une des fonctions principales étaient d'agir à titre de conseiller en matière d'hygiène auprès de la CCEA et des provinces. Un service de dosimétrie photographique fut établi en 1951 (22) à la demande du Conseil fédéral de la santé. Peu de temps après, en 1954, quand les Américains firent les premiers essais de la bombe à fusion ou à l'hydrogène dans le Pacifique, les travaux se concentrèrent davantage sur le relevé des retombées radioactives et sur l'évaluation des effets possibles sur la santé de la population générale. Les recommandations de la Division de la radioprotection suivaient étroitement celles de la CIPR (22).

À la fin de la période, plusieurs concepts fondamentaux étaient déjà en vigueur, ainsi qu'un système d'unités physiques et d'unités pondérées par des facteurs biologiques pouvant servir en radioprotection. Des organismes avaient été formés au niveau international et au niveau national, y compris au Canada. Bien que le Canada ne se soit pas encore doté d'un règlement de radioprotection officiel détaillé, à l'époque, la pratique utilisée dans le Projet canadien d'énergie nucléaire était en avance sur les recommandations courantes de la CIPR, surtout à cause de la compétence des biologistes et des spécialistes en radioprotection associés au projet.

1956-1965 : Règlement canadien

Au début de la période, la CIPR travaillait à sa publication n° 1 qui contenait des modifications clefs à son approche et qui parut en 1959 (23). La publication notait dès l'abord que les niveaux d'exposition admissibles précédents étaient exprimés en doses par période plutôt courte (1 jour ou 1 semaine) et qu'on avait supposé que, si ce débit de dose moyen était suffisamment faible, aucune lésion corporelle importante n'apparaîtrait du vivant de la personne. Par contre, on commençait de plus en plus à croire que l'accumulation de faibles doses pourrait causer des dommages biologiques à long terme, et notamment des effets génétiques, chez les descendants des personnes irradiées. La Commission accepta apparemment le concept de relation dose-réponse linéaire sans seuil dans le cas des effets tardifs, bien que certains doutes aient été exprimés quant à l'existence ou non d'un seuil en deçà duquel n'apparaîtraient pas de cas de leucémie dus aux rayons X et des cas de cancer des os dus au radium (23).

L'accumulation des dommages somatiques et génétiques chez la personne était donc limitée par une formule qui assurait que la dose annuelle moyenne au corps entier ou aux organes critiques ne dépasserait pas 5 rem par année à partir de l'âge de 18 ans, tandis que la limite maximale recommandée pour toute année donnée serait de 12 rem (23). Une limite trimestrielle de 3 rem pour toute période de 13 semaines consécutives fut aussi recommandée. On recommandait d'éviter autant que possible les doses uniques de 3 rem, surtout chez les femmes en âge de procréer.

Pendant que la CIPR préparait sa publication, la CCEA s'affairait à établir son projet de nouveau règlement avec le concours de la Division de la radioprotection du ministère fédéral de la Santé et du Bien-être social, d'Énergie atomique du Canada limitée (EACL), ainsi que des ministères de la Santé et du Travail de l'Ontario. Par suite de la recommandation du Conseil fédéral de la santé, en 1959, les questions relatives à l'hygiène et à la sécurité furent traitées dans le Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique qui fut promulgué en 1960. Le nouveau règlement était conforme en général aux recommandations de la publication n° 1 de la CIPR (23). Il se montrait néanmoins un peu plus prudent en ajoutant à la limite trimestrielle de 3 rem, dans le cas des travailleurs sous rayonnements, une limite de 5 rem pour toute période de 52 semaines consécutives. Il fallait de plus obtenir une exemption spéciale de la CCEA pour invoquer la formule d'âge. L'emploi de femmes enceintes comme travailleuses sous rayonnements était interdit. Le Règlement s'appliquait spécifiquement aux personnes qui utilisaient des matières radioactives : l'utilisation des rayons X à des fins médicales n'était pas et n'est toujours pas régie par la CCEA. Toutefois, plusieurs provinces avaient déjà adopté des lois conformes aux recommandations de la CIPR pour réglementer l'utilisation des rayons X (22).

Entre-temps, le Projet d'énergie nucléaire canadien était devenu Énergie atomique du Canada Limitée. Il est intéressant de noter qu'EACL ne s'est jamais servie de la formule d'âge et que, comme elle entretenait des contacts avec la CIPR, elle avait adopté une dose maximale de 5 rem au corps entier, dès 1956. Les dosimètres photographiques utilisés pour enregistrer les expositions au corps entier des travailleurs sous rayonnements causaient pourtant des problèmes. Les pellicules surestimaient les doses de rayonnement dues aux rayons X à faible énergie (24) de sorte que les doses au corps entier enregistrées étaient quelque peu plus élevées que les doses reçues en réalité. Bien que diverses améliorations aient été apportées aux dosimètres photographiques durant la décennie, le problème ne fut résolu complètement qu'après l'introduction des dosimètres thermoluminescents sur le marché, en 1983 (24).

La CIPR publia également sa publication n° 2 en 1959 (25), où elle apportait certaines modifications mineures à la publication n° 1. Elle soulignait, entre autres, que les doses professionnelles des travailleurs médicaux étaient incluses dans les limites de doses recommandées, bien que les doses aux malades en étaient exclues, que les limites de doses recommandées pour les membres du public en général s'appliquaient à chaque personne de cette population, que la limitation de l'exposition moyenne de la population totale devaient être interprétées par les autorités de chaque pays, et que tout dommage possible aux tissus foetaux des femmes enceintes présentait un problème spécial de risque. Toutefois, la publication traitait surtout des concentrations maximales admissibles dans l'air et dans l'eau de quelque 278 radionucléides et des méthodes

utilisées pour calculer ces valeurs à l'aide d'un modèle de charge corporelle constante maintenue par une incorporation constante. Les concentrations maximales admissibles du radon et de ses produits de filiation furent réduites au tiers des valeurs recommandées en 1954. La publication (25) devait servir de norme de référence dans les milieux de radioprotection pendant de nombreuses années à venir.

Dans sa publication n° 6, en 1964, la CIPR précisait le sens de ses recommandations. Le terme «équivalent de dose» était utilisé pour exprimer la dose en rem, tandis que le terme «facteur de qualité» était introduit en radioprotection et remplaçait l'efficacité biologique relative pour éviter toute confusion avec l'emploi que les radiobiologistes faisaient de cette dernière expression dans des expériences individuelles afin de décrire les résultats des effets biologiques visés. La CIPR recommandait une dose trimestrielle maximale de 1,3 rem pour les femmes en âge de procréer et une dose maximale de 1 rem pour le foetus tout au long de la grossesse après qu'elle a été diagnostiquée (c'est-à-dire supposément moins de deux mois après la conception). Elle déclarait également (26) qu'il semblait possible, d'après certains fondements théoriques ou expérimentaux, que, si la dose totale ou le débit de dose de rayons X, de rayons gamma et de rayonnement bêta était très faible, tout effet carcinogène serait directement proportionnel à la dose totale et indépendant du débit de dose. L'hypothèse était implicite dans les recommandations antérieures sur les niveaux admissibles et on jugeait que c'était une base suffisante pour l'évaluation, bien qu'il n'y ait aucune preuve existante qui le confirmerait. La CIPR reconfirmait le concept de relation dose-réponse linéaire sans seuil pour les effets génétiques.

En 1955, le Comité scientifique des Nations-Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) avait été formé afin de recueillir et d'évaluer les rapports sur les niveaux des rayonnements ionisants et des matières radioactives dans l'environnement, ainsi que sur les effets biologiques des rayonnements sur les humains. Plusieurs scientifiques et organismes canadiens ont contribué aux travaux de ce comité qui continue de publier des études scientifiques très utiles sur les sujets mentionnés. Bien que le Comité travaille étroitement avec les représentants scientifiques de la CIPR et de différents organismes nationaux chargés de radioprotection, il ne publie pas de recommandations en radioprotection. Son deuxième rapport, publié en 1962, comprend une comparaison des risques de cas de cancer et de tares génétiques dus aux principales sources de rayonnements ionisants, mais ne donne aucun calcul estimatif quantitatif sur les risques réels par unité de dose reçue (27). Cette question allait devenir plus tard l'une des principales préoccupations du comité à mesure qu'il disposait des données de recherche pertinentes.

1966-1975 : Quantification du risque

La CIPR prépara le terrain, dès le début de la décennie, en essayant pour la première fois d'estimer quantitativement les effets carcinogènes et génétiques possibles de l'exposition aux faibles niveaux de rayonnement (28). Elle examina les anormalités développementales dues à l'irradiation du foetus, mais ne dérivait aucun calcul estimatif quantitatif du risque. Les résultats de ces travaux figurent au tableau A1, à côté des calculs estimatifs quantitatifs plus récents de certains autres comités scientifiques. On peut constater ainsi que les premiers calculs estimatifs de la CIPR en 1966 ont pu, à la lumière des

données supplémentaires accumulées depuis, surestimer le nombre total de cas de maladies génétiques graves de toute les générations touchées après l'irradiation des parents. Malgré tout, le concept de risque quantitatif par unité de dose avait été établi.

Les doses annuelles maximales admissibles ne changèrent pas beaucoup dans les recommandations officielles suivantes de la CIPR (publication n° 9) : 5 rem par année pour les gonades, la moëlle ou le corps entier, moyennant certaines restrictions pour les femmes en âge de procréer et pour les femmes enceintes. Pour le public, il fallait diviser cette valeur par 10.

Ces recommandations de la CIPR furent incorporées dans le révision du règlement canadien de 1974, qui allait rester en vigueur jusqu'en 1986, sauf pour deux ajouts dont il sera question plus loin. La protection des mineurs d'uranium resta par tradition sous la juridiction des provinces jusqu'en 1978.

Ontario Hydro commença à jouer un rôle important en radioprotection pratique au Canada (35) en ouvrant d'importantes centrales nucléaires à Douglas Point, en 1967, à Pickering, en 1971, et à Bruce, en 1975. La tradition se poursuivit par l'entrée du Québec et du Nouveau-Brunswick dans le secteur de la production d'énergie nucléaire. Des cours en radioprotection furent donnés aux travailleurs de la Division nucléaire d'Ontario Hydro et le principe ALARA de maintenir les doses de rayonnement au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre fut appliqué dès l'origine du programme (35). Les critères de conception des réacteurs furent également améliorés de façon importante. La cible de conception des réacteurs de Pickering, qui a d'ailleurs été atteinte ordinairement, était de 5 mrem par année ou 1/100 de la limite recommandée par la CIPR, dans le cas des particuliers du public les plus exposés qui, en permanence, pourraient vivre près de toute centrale nucléaire et y cultiver leurs sources d'alimentation. Les améliorations à la conception expliquent aussi en grande partie la chute notable des expositions professionnelles totales de plus de 1 à 0,1 personne·rem par mégawatt·année d'électricité produite. Il est également digne de noter qu'Ontario Hydro est le premier organisme canadien à établir durant la décennie un suivi annuel continu des cas de décès de ses employés courants et retraités afin d'évaluer les conséquences possibles de l'exposition professionnelle aux rayonnements au travail pour la santé de ses employés (36).

Entre-temps, la CIPR continuait de mettre au point le concept de risque quantitatif comme base de la limitation des doses.

1976-1985 : Principes et sophistication

Le principe radiobiologique déclaré sous-tendant les recommandations de la CIPR (32) en 1977 était que la probabilité de cas de cancer chez les personnes irradiées et les mutations héréditaires affectant les générations futures a un rapport linéaire sans seuil avec la dose. Certaines ambiguïtés du texte des recommandations de 1977 (32) ont été clarifiées dans une déclaration de 1978 (37) selon laquelle «les calculs estimatifs de risque ont pour but d'être des calculs réalistes des effets des rayonnements en cas de faibles équivalents de doses annuels». Les recommandations de 1977 (32) se fondent sur des évaluations quantitatives du risque pour les personnes et du dommage global pour la société. La sécurité absolue n'est pas un objectif crédible, sauf dans le cas des effets

Tableau A1

QUELQUES CALCULS ESTIMATIFS DES RISQUES CARCINOGÈNES ET GÉNÉTIQUES DUS À DE FAIBLES DOSES DE RAYONNEMENTS IONISANTS [a]

Source	Cas de cancer dus à 10^4 personne-rem ou 10^2 personne-sievert		Cas de maladies génétiques dus à 10^4 personne-rem ou 10^2 personne-sievert	
	Fatal	Total	Première génération	Toutes les générations
CIPR 1966 (28)	≥ 0,4	0,6	0,2	85
UNSCEAR 1972 (29)	≥ 0,7-1,4	≥ 1,25-3,2	0,06-0,15	3
BEIR 1972 (30)	1,5-2	3-4	0,12-2	0,6-15
UNSCEAR 1977 (31)	1	1	0,2-0,6	1,85
CIPR 1977 (32)	1,0 (hommes) 1,5 (femmes)	2,5	0,5 [b]	2
BEIR 1980 (33)	0,7-2,3 [c]	1-3	0,05-0,75	0,6-11
UNSCEAR 1982 (34)	≈ 1	-	0,2	1,5

[a] Les facteurs de risque indiqués pour les maladies génétiques dues aux rayonnements s'appliquent aux doses reçues avant de procréer; pour les expositions de la population générale ou d'un groupe de travailleurs sous rayonnements de tous âges, ces facteurs de risque devraient être multipliés par 0,4 (32) puisque 60 pour 100 d'entre eux ont dépassé l'âge moyen de procréer. Par conséquent, 60 pour 100 de la dose totale n'est pas importante du point de vue génétique.

[b] La valeur représente environ la moitié de la valeur recommendée par la CIPR en 1977 (32) pour la somme des maladies génétiques de la première et de la deuxième générations.

[c] Les calculs estimatifs de risque de cancer dans le rapport BEIR de 1980 s'appliquent aux rayonnements de faible transfert linéique d'énergie seulement. Le texte n'est pas tout à fait clair, mais semble supposer des valeurs semblables pour les rayonnements à fort transfert d'énergie linéique .

non stochastiques des rayonnements, comme les cataractes ou les brûlures pour lesquelles il existe un seuil évident. Le concept de l'organe critique est remplacé par le concept du risque total, selon lequel le risque total représente la somme des risques de chaque organe irradié. Les facteurs de risque de chaque organe figurent au tableau 2. Le facteur de qualité des particules alpha est élevé à 20, comme le suggérait un rapport de la CIPR, en 1973 (38). Les risques personnels au cours des années suivant l'irradiation doivent être considérés comme cumulatifs. Le dommage global pour la société, dû à de faibles doses reçues par de nombreuses personnes, est indiqué le plus commodément par la dose collective. On doit s'efforcer de respecter le principe ALARA. Les nouvelles unités SI sont introduites (1 rem = 0,01 sievert). La limite de dose au corps entier des travailleurs sous rayonnements reste à 5 rem ou 50 mSv par année (32). Toutefois, on recommande de nouvelles limites pour l'irradiation des organes par des radionucléides internes, dépendant du risque biologique et des facteurs de pondération correspondants prévus pour chaque organe (tableau A2). Une limite prépondérante de 500 mSv par année est imposée aux doses de chaque organe pour prévenir les effets non stochastiques (32). La limite de dose pour le cristallin est limitée à 300 mSv et plus tard à 150 mSv par année.

Par suite de ces nouvelles recommandations, la CIPR a fait paraître une publication détaillée (39) qui déterminait les limites annuelles d'incorporation pour les expositions professionnelles à un grand nombre de radionucléides. Ces limites ont été dérivées selon les principes expliqués dans la publication n° 26 de la CIPR (32) et de nombreuses données accumulées depuis 1959 sur les caractéristiques physiques, le métabolisme et la rétention de divers radionucléides. Ces nouvelles limites d'incorporation étaient supérieures dans certains cas et inférieures dans d'autres par rapport aux valeurs dérivées d'après la publication n° 2 de la CIPR (25). Les recommandations de 1979 modifient les recommandations de 1959 en ce qui concerne le radium 226 dans l'eau potable. En 1950, 1954 et 1959, la CIPR avait adopté le principe que la quantité totale de radium fixé dans les os ne devrait pas dépasser 0,1 µCi. Deux modèles métaboliques avaient été examinés en 1959 (25); vu les incertitudes éprouvées à cette époque, on avait choisi le modèle le plus prudent qui donnait la concentration maximale admissible la plus faible dans l'eau potable. Les concentrations maximales admissibles recommandées en 1959 étaient de 100 pCi ou 3,7 Bq par litre d'eau potable dans le cas des travailleurs sous rayonnements et 1/30 de cette concentration pour le public en général (25). En 1973 (40), il était déjà apparent que le modèle métabolique plus restrictif était incorrect. Les recommandations de la CIPR, en 1979 (39), font état d'une concentration maximale admissible de 100 Bq de radium 226 par litre d'eau potable dans le cas des travailleurs sous rayonnements. La limite dérivée pour le radium 226 fixé dans les os représente environ 40 pour 100 des valeurs recommandées en 1941 (17) et 1959 (25). Les lignes directrices canadiennes au sujet des concentrations maximales admissibles et pour les concentrations souhaitables (ou concentrations cibles) dans l'eau potable, pour le public en général, ont été établies arbitrairement par le ministère de la Santé et du Bien-être social (41) à 1/100 et à 1/1000 de cette nouvelle limite professionnelle (voir tableau A3).

Tableau A2

FACTEURS DE RISQUE ET FACTEURS DE PONDÉRATION POUR CHAQUE ORGANE ET TISSU (32)

Organe ou tissu	Risque stochastique estimé pour 10^4 personne-rem ou 10^2-personne-sievert		Facteur de pondération	
	Cancer fatal [a]	Maladies génétiques chez les enfants et petits-enfants [b]		
Gonades	-	0,4	0,25	
Sein (moyenne pour hommes et femmes)	0,25	-	0,15	
Moëlle	0,2	-	0,12	
Poumon	0,2	-	0,12	
Thyroïde	0,05	-	0,03	
Surface des os	0,05	-	0,03	
Autres tissus	0,5	-	0,30	[c]
Peau	-	-	-	[d]
Corps entier	1,25	0,4	1,0	

[a] On n'a pas tenu compte des cas de cancer non tagals ou curables dus aux rayonnements en dérivant les facteurs de pondération de chaque organe.

[b] Les risques génétiques estimés s'appliquent à un groupe moyen de personnes de toux âges.

[c] La CIPR recommande un facteur de pondération de 0,06 pour chacun des cinq organes ou tissus qui reçoivent les équivalents de dose les plus élevés.

[d] La CIPR a recommandé un facteur de pondération de 0,01, en 1978, pour tenir compte des cas de cancer de la peau fatal dus aux rayonnements. La valeur est généralement trop faible pour avoir un effet important sur le calcul de l'équivalent de dose effectif.

Tableau A3

CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES DE RADIUM 226 DANS L'EAU POTABLE

Population	Concentration maximale admissible dans l'eau potable (en becquerels par litre)	Équivalent de dose effectif approximatif (en millisieverts par année)
Travailleurs sous rayonnements (CIPR, 1979) (39)	100	20 [a]
Public canadien (SBEC, 1978) (41)		
- maximum admissible	1	0,2
- cible souhaitable	0,1	0,02

[a] L'équivalent de dose effectif est égal à environ 20 mSv par année, plutôt que 50 mSv par année, parce que les concentrations maximales dans l'eau potable sont restreintes par une limite non stochastique de 500 mSv par année pour la surface des os.

Bien que la CIPR recommande depuis longtemps que les irradiations des malades dues aux applications médicales des rayons X et de d'autres sources de rayonnements ionisants soient exemptées des limites réglementaires, elle continue de suivre la tradition établie (19) de recommander des méthodes pratiques pour protéger les malades dans le cours des diagnostics radiologiques.

Deux modifications importantes ont été apportées au règlement canadien pendant la décennie.

Aucune limite particulière applicable aux expositions des mineurs d'uranium aux produits de filiation du radon n'a été prévue dans la réglementation canadienne avant 1978. L'exposition maximale admissible aux produits de filiation du radon dans les mines ontariennes avait été établie à 12 WLM par année, par la province, en 1967 (43). [On a défini 1 WLM (working level month) ou 1 niveau alpha-mois comme l'équivalent de l'exposition durant 170 heures à 1 WL, soit la concentration de 100 pCi ou 3,7 Bq par litre d'air de radon en équilibre avec ses produits de filiation à période courte.] Cette norme provinciale était cohérente avec les recommandations de la CIPR en 1954 (19) et les normes américaines établies (un examen des données pertinentes est fourni notamment à la référence 44). Plusieurs inquiétudes avaient pourtant été exprimées après que la CIPR eut recommandé, en 1959, une exposition maximale admissible équivalant à 4 WLM par année (25). Par suite des recommandations officielles de l'étude détaillée sur la santé et la sécurité des mineurs de l'Ontario en 1976 (43), la CCEA a imposé, en 1978, la limite professionnelle de 4 WLM par année qui était appliquée dans les mines ontariennes depuis 1975 (43). Le lecteur trouvera à l'article 4.5 du texte principal du présent document un examen des répercussions des recommandations plus récentes de la CIPR dans le contexte actuel.

L'autre modification au règlement canadien a eu lieu en 1985 et permet depuis l'égalité d'emploi des femmes qui ne sont pas enceintes, en éliminant les limites de doses plus restrictives des travailleuses sous rayonnements qui ne sont pas enceintes (46). D'autres détails figurent à l'article 4.6 du texte principal.

La CCEA est en train de remanier le règlement canadien (47) et a déjà établi un système de consultation publique et scientifique avant d'établir de nouvelles mesures réglementaires. Le nouveau règlement ne sera promulgué qu'après examen complet de toutes les observations reçues.

Résumé

Les points saillants de l'histoire de la radioprotection au Canada jusqu'en 1985 ont été exposés. Peu après la découverte des rayonnements ionisants vers 1895, le besoin de protection s'est fait sentir. L'inquiétude grandissante a entraîné des évaluations globales et le développement des sciences fondamentales pertinentes. La venue de l'énergie nucléaire en 1945 a augmenté l'importance et la capacité de protection. La Loi sur le contrôle de l'énergie atomique faisait partie de l'expansion internationale de l'énergie atomique et de la conscience publique qui a abouti finalement à l'élaboration de règlements fédéraux et provinciaux au Canada. À mesure que la CIPR précisait sa pensée, grâce entre autres à la participation notable des scientifiques canadiens, le Canada mettait au point sa réglementation tant fédérale que provinciale en matière de radioprotection. À l'heure actuelle, on attend la promulgation d'un règlement canadien remanié qui traduise les recommandations de la CIPR.

Remerciements

Les renseignements contenus dans la présente annexe ont été adaptés par D.K. Myers à partir d'un exposé de A.M. Marko et R.V. Osborne présenté à l'assemblée annuelle de l'Association canadienne de radioprotection, à St. John (Nouveau-Brunswick), 11-13 juin 1985, commémorant le 90e anniversaire de la découverte des rayons X. Les autres sources d'information comprennent le manuscrit inédit de G.C. Stewart, "A History of the Development of Radiation Protection" (1971) et les documents originaux cités en référence.

Références de l'Annexe A

(1) W.C. Roentgen, 'Eine neue Art von Strahlen', Sitzungsberichte der Physik, Med. Ges. Wurzburg, 1895, s. 132.

(2) H. Becquerel, «Sur les radiations émises par phosphorescence», Compte rendu à l'Académie des Sciences, 1896, vol. 122, p. 420.

(3) H. Rolleston, "Harmful Effects of Irradiation: a Critical Review", Quartely Journal of Medecine, 1930, vol. 23, p. 101.

(4) F.G. Spear, Radiations and Living Cells, New York, John Wiley and Sons Inc., 1953.

(5) Frieben, 'Cancroid des rechten Handrückens', Deutsche Med. Wochenschrift, 1902, vol. 28, s. 335.

(6) J. Becquerel et P. Curie, «Action physiologique des rayons de radium», Compte rendu à l'Académie des Sciences, 1901, vol. 132, p. 1289.

(7) W, Rollins, "Notes on X-Ray Light Vacuum Tube Burns", Boston Medical Science Journal, 1902, vol. 146, p. 39.

(8) A, Mutscheller, "Physical Standards of Protection against Roentgen Ray Dangers", American Journal of Roentgenology, 1925, vol. 13, p. 65.

(9) L.S. Taylor, "History of the Internatipnal Committee on Radiological Units and Measurements", Haelth Physics, 1958, vol. 1, p. 97.

Id., "History of the International Commission on Radiological Protection (ICRP)", Health Physics, 1958, vol. 1, p. 97.

Id., "Brief History of the National Committee on Radiological Protection and Measurement (NCRP) Covering the Period 1929-1946", Health Physics, 1958, vol. 1, p. 3.

(10) H. Fricke and O. Glasser, "Standardization of the Roentgen-Ray Dose by Means of the Small Ionization Chamber", American Journal of Roentgenology, 1925, vol. 13, p. 462.

(11) "International Recommendations for X-Ray and Radium Protection", British Journal of Radiology, 1934, vol. 7, p. 83.

(12) U.S. Department of Commerce, X-Ray Protection, National Bureau of Standards Handbook No. 20, 1936.

(13) H.J. Muller, "The Effects pf Roentgen Rays upon Hereditary Material", in C.G. Curtis, The Science of Radiology, Springfield (Ill.), 1933.

(14) "International Recommendations for X-Ray and Radium Protection", British Journal of radiology, 1937, vol. 10.

(15) J.S. Mitchell, "Memorandum on Some Aspects of the Biological Action of Radiations, with Special Reference to Tolerance Problems", Document I-17, National Research Council, Atomic Energy Project, Montreal, 1945.

(16) G.C. Butler, "The Biological Basis of Maximum Permissible Exposures for Workers in the Field of Atomic Energy", Document M.I.-2, National Research Council, Atomic Energy Project, Chalk River, 1947.

(17) "Safe Handling of Radioctive Luminous Compounds", National Bureau of Standards Handbook H-27, U.S. Government Printing Office, Washington, 1941.

(18) "International Recommendations on Radiological Protection", July 1950, publié pour diffusion au Canada par le ministère de la Santé et du Bien-être social, Ottawa (publié aussi comme U.S. National Bureau of Standards Handbook 47 et dans British Journal of Radiology, January 1951, vol. 24).

(19) "Recommendations of the ICRP, December 1954", British Journal of Radiology, Supplement no. 6, 1955.

(20) L.S. Taylor, Radiation Protection Standards, Cleveland (Ohio), CRC Press, 1971.

(21) H.B. Newcombe, "Nuclear Risks", Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-6477, 1979.

(22) P.M. Bird, "Radiation Protection in Canada", Parts I and II, Canadian Medical Association Journal, 1964, vol. 90, pp. 1024, 1075 and 1114.

(23) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Publication No. 1, Pergamon Press, 1959.

(24) G. Cowper, "Radiation Exposure Records in AECL; G1. External Radiation. Appendix G in J.L. Weeks, "A Study of the Health of Employees of Atomic Energy of Canada Limited", Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-6813, 1981.

(25) ICRP, "Recommendations of the ICRP and Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation", Publication No. 2, Pergamon Press, 1959.

(26) ICRP, "Recommendations of the ICRP", Publication No. 6, Pergamon Press, 1964.

(27) United Nations, "Report of the United Nations Scientific Committee on the Effets of Atomic Radiation", A/5216, General Assembly Official Records 17th Session, Supplement No. 16, New York, 1962.

(28) ICRP, "The Evaluation of Risks from Radiation", Publication No. 8, Pergamon Press, 1966.

(29) United Nations, "Ionizing Radiation: Levels and Effects", UNSCEAR Report, New York, 1962.

(30) BEIR, "The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation", Washington, National Academy of Sciences, 1972.

(31) United Nations, "Sources and Effects of Ionizing Radiation", UNSCEAR Report, New York, 1977.

(32) CIPR, "Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique", Publication n° 26, Annales de la CIPR, 1977, vol. 1, n° 3.

(33) BEIR III Report, "The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation", Washington, National Academy of Sciences, 1980.

(34) United Nations, "Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects", UNSCEAR 1982 Report, New York, 1982.

(35) Ontario Hydro, "Ontario Hydro Radiation Protection Regulations 1962", Toronto, 1982.

R. Wilson *et al.*, "The Application of ALARA in Ontario Hydro", paper presented at Health Physics Society Annual Meeting, Chicago, 1985, Ontario Hydro Report HSD-IR-85-6, Toronto, Ontario Hydro, 1985.

R. Wilson *et al.*, "Occupation Dose Reduction Experience in Nuclear Power Stations", Ontario Hydro Report HSD-IR-85-1, Toronto, Ontario Hydro, 1985.

(36) T.W. Anderson, "Ontario Hydro Mortality 1970-1982", Ontario Hydro, Health and Safety Division, Toronto, 1983.

(37) "Statement from the Stockholm Meeting of the ICRP", Annals of the ICRP, 1978, vol. 2, no. 1.

(38) ICRP, "Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication No. 15", Publication No. 21, Pergamon Press, 1973.

(39) ICRP, "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers", Publication No. 30, 1979-1982, Annals of the ICRP, vol. 2, nos. 3/4 to vol. 8, nos. 1-4.

(40) ICRP, "Alkaline Earth Metabolism in Man", Publication No. 20, Pergamon Press, 1973.

(41) Santé et Bien-être social Canada, «Lignes directrices canadiennes pour la qualité de l'eau potable», Ottawa, 1978.

(42) ICRP, "Protection of the Patient in Diagnostic Radiology", Publication No. 34, Annals of the ICRP, 1982, vol. 9, nos. 2/3.

(43) Ontario. Royal Commission on the Health and Safety of Workers in Mines (J.M. Ham, Commissioner), Report, Toronto, 1976.

(44) D.K. Myers *et al.*, "Review of Epidemiological Studies on Hazards of Radon Daughters", in M. Gomez (ed.), Radiation Hazards in Mining, New York, Society of Mining Engineers, 1981, p. 513.

(45) ICRP, "Radiation Protection of Workers in Mines", Publication No. 47, Annals of the ICRP, 1986, vol. 16, no. 1.

(46) Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique, modification, DORS/85-335, Gazette du Canada, Partie II, avril 1985, vol. 119, n° 9, p. 1884.

(47) Commission de contrôle de l'énergie atomique, "Projet de remaniement du Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique, document de consultation C-83, Ottawa, 1986.

ANNEXE B

REPRÉSENTANTS CANADIENS AUPRÈS DE LA CIPR ET DE UNSCEAR

Une liste de tous les représentants canadiens qui ont participé officiellement à l'établissement des rapports de la CIPR et de UNSCEAR paraît plus bas. Elle ne comprend pas plusieurs scientifiques canadiens qui ont fourni des suggestions très utiles, mais qui n'ont pas participé aux réunions des comités et dont le nom ne figure pas dans les documents officiels.

Les participants aux travaux de la CIPR sont désignés comme membres de la commission principale ou de l'un des comités de la CIPR. Les participants aux travaux de UNSCEAR sont désignés comme délégués officiels du Canada ou conseillers scientifiques (ou membres du Secrétariat). Dans ce cas, la date indiquée est celle de la publication de la version finale du rapport UNSCEAR auquel la personne a collaboré.

CIPR

	Commission principale	Comité	
J. Bouchard	1950-1956	1956-1959	
G.C. Butler		1962-1979	
A.J. Cipriani	1950-1956	1953-1956	
C. Garrett		1956-1962	
H.E. Johns		1956-1962	
J.R. Johnson		1984-	[a]
C.A. Mawson		1956-1962	
H.B. Newcombe	1965-1977	1959-1973	
R.V. Osborne		1981-1989	
F.D. Sowby		1956-1962	[b]
C.G. Stewart	1962-1977	1956-1969	
E.A. Watkinson	1956-1962	1953-1959	
R. Wilson		1977-1981	

---

[a] Groupe de travail de la CIPR sur la dosimétrie des poumons.

[b] Secrétaire de la commission principale de 1962 à 1984.

UNSCEAR

	Représentant	Conseiller
J.D. Abbatt		1969
R.K. Aplleyard		1958, 1962
P.J. Barry		1969, 1972
P.M. Bird		1958, 1962
A.H. Booth		1966, 1977
W.R. Bush		1977, 1982, 1986
G.C. Butler	1964, 1966, 1969 [a] 1972, 1977, 1982	1986
H. Cameron		1962
J.S. Haskill		1972
C. Hunter		1958
W.E. Grummitt		1962, 1964, 1966, 1969
A.P. James		1962, 1972
G.H. Josie		1958, 1962
E.G. Létourneau	1982, 1986	
A.M. Marko	1982, 1986	
C.A. Mawson		1958
B.B. Migicovsky		1962
E. Muller		1982
D.K. Myers		1982, 1986
H.B. Newcombe		1958, 1962, 1964, 1966
F. Prantl		1982
H.C. Rotschild		1977, 1982
F.D. Sowby		1958
J.B. Sutherland		1969
B.K. Trimble		1977
E.A. Watkinson	1958, 1962	

---

[a] Président de UNSCEAR.

REMERCIEMENTS

COMITÉ CONSULTATIF DE LA RADIOPROTECTION

GROUPE DE TRAVAIL SUR LES PRINCIPES DE RADIOPROTECTION

A.M. Marko, président

P. Lachance

E.G. Létourneau

H.B. Newcombe

D.K. Myers